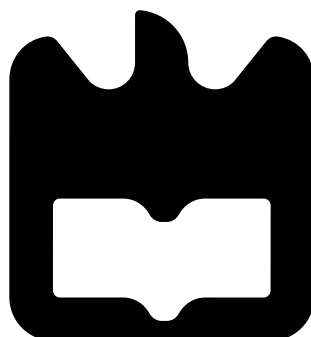




**Liliana Mendes
Sousa**

Emissor ótico para LIDAR





**Liliana Mendes
Sousa**

Emissor ótico para LIDAR

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Maria Sousa da Rocha, Investigadora do Instituto de Telecomunicações de Aveiro e co-orientação científica do Doutor Miguel Vidal Drummond, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações de Aveiro e do Doutor Abel Lorences Riesgo, Investigador Post. Doc. do Instituto de Telecomunicações de Aveiro.

Apoio financeiro da FCT/MEC através de fundos nacionais no âmbito do projeto UID/EEA/50008/2013.

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Luís Manuel Cadillon Martins Costa

Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Doutor Miguel Vidal Drummond

Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações de Aveiro (co-orientador)

Prof. Doutora Maria do Carmo Raposo de Medeiros

Professora Associada do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores da Universidade de Coimbra

**agradecimentos /
acknowledgements**

À Ana, ao Abel, ao Miguel e ao professor Paulo Monteiro pelo apoio e disponibilidade.

Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro por disponibilizar os meios que tornaram possível o trabalho realizado.

Ao projeto RETIOT (POCI-01-0145-FEDER-016432) pelo suporte fornecido.

À Bosch Car Multimedia Portugal por providenciar o material necessário para realizar o trabalho experimental.

Aos meus pais e amigos, colegas e professores que me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

Palavras-chave

Condução autónoma, cristais líquidos, elementos óticos difrativos, emissor, interferência, LIDAR, modulador espacial de luz.

Resumo

O LIDAR é um dispositivo que mede a distância a objetos, podendo também fornecer a imagem destes a três dimensões. É já utilizado em várias áreas, mas a sua integração em automóveis começou a ser estudada apenas recentemente. Com o aparecimento de automóveis de condução autónoma, o desenvolvimento de sensores de obstáculos é fundamental pois o automóvel tem que detetar possíveis perigos e medir a distância a que se encontra destes. O trabalho realizado teve como objetivo o desenvolvimento de um emissor ótico a ser integrado em sensores LIDAR. Este emissor ótico tem de ser fácil de implementar, barato, energeticamente eficiente, estável e cumprir normas de segurança específicas para que a sua implementação em veículos seja possível. Numa primeira abordagem, foi estudado teoricamente o uso de um modulador espacial de luz, baseado em matrizes de cristais líquidos, para realizar o varrimento do cenário a uma dimensão através da mudança de direção do feixe. Posteriormente, realizou-se o estudo da divisão de um feixe luminoso em vários feixes com a mesma potência, pois esta alternativa permite obter informações acerca de determinado cenário mais rapidamente. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, para ser possível obter os padrões pretendidos, são necessários parâmetros de rede bastante inferiores à dimensão do píxel dos moduladores espaciais de luz comercialmente disponíveis. Assim, a integração do modulador espacial de luz como emissor num sensor LIDAR não foi considerada uma opção viável. Seguidamente, foi estudada experimentalmente a viabilidade da utilização de elementos óticos difrativos, componentes de baixo custo e dimensão, desenhados para atuarem como divisores de feixes luminosos. Foram testados seis elementos óticos difrativos, que geraram, a partir do feixe luminoso incidente, diferentes padrões, constituídos por vários pontos luminosos com uma distribuição de potência aproximadamente uniforme. Concluiu-se que a utilização dos elementos óticos difrativos é uma alternativa a seguir em estudos posteriores.

Keywords

Autonomous driving, liquid crystals, diffractive optical elements, emitter, interference, LIDAR, spatial light modulator.

Abstract

LIDAR is a device that measures the distance to objects, and can also provide their three-dimensional image. It has already been used in different areas, but its integration into vehicles has only recently been studied. The emergence of autonomous vehicles led to the development of obstacle sensors, which are essential to make the vehicle able to detect potential hazards and measure the distance to them. The work carried out was based on the development of an optical emitter to be integrated into LIDAR sensors. This optical emitter has to be easy to implement, low cost, energy efficient, stable and meet certain safety standards. In the first approach, we studied the use of a spatial light modulator, based on matrices of liquid crystal, to scan a scene along one dimension through beam steering. Then, we studied the division of a laser beam into several beams with the power equally distributed, because this alternative allows to obtain information about a certain scenario faster and more efficiently. From the obtained results, we concluded that in order to generate the desired patterns, grating parameters much smaller than the pixel size of commercially available spatial light modulators are required. Consequently, we studied experimentally the feasibility of the use of diffractive optical elements, low cost and small components, designed to be beamsplitters. We tested six diffractive optical elements which originated, from an incident light beam, different patterns consisting of several spots with the same power approximately. We concluded that the use of diffractive optical elements is an alternative to be followed in later studies.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de Acrónimos	ix
Lista de Símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivo	6
1.3 Estrutura	7
2 Modulador espacial de luz: estudo teórico	8
2.1 Modulador espacial de luz	8
2.2 Modelo teórico	10
2.2.1 Discretização das fontes elementares	14
2.3 Casos de estudo	15
2.3.1 Estudo do SLM PLUTO	16
2.3.2 Estudo para diferentes larguras de píxel	19
2.4 Sumário	22
3 Elementos óticos difrativos: estudo experimental	23
3.1 Elementos óticos difrativos	23
3.2 Caracterização de padrões obtidos com DOEs	24
3.2.1 Caracterização dos Componentes	24
3.2.2 Caracterização	31
3.3 Sumário	41
4 Considerações finais e trabalho futuro	42
4.1 Conclusões	42
4.2 Trabalho futuro	43
Bibliografia	44

Lista de Figuras

1.1	Princípio de funcionamento do cálculo da distância entre o LIDAR e um objeto a partir do tempo de voo dos fótons (adaptado de [1, 3]).	1
1.2	Esquema da disposição dos sistemas de câmaras, RADAR e LIDAR nos automóveis da Waymo (adaptado de [7, 9]).	2
1.3	Sensibilidade relativa do olho a diferentes comprimentos de onda na visão fotópica e escotópica. Adaptado de [18].	4
1.4	Esquema representativo da posição angular de uma fonte de luz, α . Baseado em [19].	4
1.5	(a) Máxima exposição permitida para exposição ocular direta (considerando α inferior a 1,5 mrad) para a luz de comprimentos de onda de 700, 750, 905 e 1050 nm (adaptado de [16]) e (b) Irradiância solar em que os compostos responsáveis pela absorção da luz num determinado comprimento de onda encontram-se a azul (adaptado de [21]).	5
1.6	LIDAR (a) HDL-64E [14], (b) Puck VLP-16 [28] e (c) Velarray [27] da Velodyne.	6
1.7	Esquema das hipóteses a estudar: (a) mudança de direção do feixe e (b) a divisão em vários feixes.	7
2.1	Esquema da disposição das moléculas nas fases (a) nemática e (b) esméctica [34].	9
2.2	Esquema da matriz de píxeis com moléculas de um cristal líquido, com campo elétrico aplicado (baseado em [37]).	9
2.3	(a) <i>Driver</i> do SLM PLUTO e (b) ampliação na sua zona onde se encontra o SLM. [38]	10
2.4	Esquema de uma montagem experimental possível para obtenção dos padrões pretendidos com o SLM.	10
2.5	Esquema do qual partiu o desenvolvimento do modelo apresentado.	11
2.6	Esquema do princípio de Huygens.	11
2.7	Esquema com a disposição das fontes elementares, em que a cor indica a diferença de fase imposta devido aos índices de refração dos píxeis.	13
2.8	(a) Sobreposição dos padrões com $N = 2$ e $N = 3$ e (b) módulo da diferença entre estes para $L = 8 \mu\text{m}$	14
2.9	(a) Sobreposição dos padrões com $N = 207$ e $N = 336$ e (b) módulo da diferença entre estes para $L = 8 \mu\text{m}$	15
2.10	Gráfico de $ dF _{\text{máx}}$ em função de dN para diferentes larguras de píxel.	15
2.11	(a) Disposição da fase nula de cada fonte elementar i ao longo de 100 píxeis dando origem a (b).	16

2.12	(a), (c), (e) Disposição da fase de cada fonte elementar i ao longo de 100 píxeis que deu origem (b), (e), (f), respectivamente.	17
2.13	Esboço do padrão de difração no regime de difração de Fraunhofer com o aumento do número de fendas consideradas (adaptado de [40]).	18
2.14	(a) Disposição das fases iniciais de cada fonte elementar i , ao longo de 100 píxeis, que deu origem ao (b) padrão.	19
2.15	Padrão obtido considerando 100 píxeis com largura de (a) $16 \mu\text{m}$ e (b) $4 \mu\text{m}$	19
2.16	Padrão obtido considerando 100 píxeis com largura de (a) $2 \mu\text{m}$, (b) $1 \mu\text{m}$, (c) $0,5 \mu\text{m}$ e (d) $0,2 \mu\text{m}$	20
2.17	Padrão obtido considerando $L = 0,2 \mu\text{m}$ e (a) 50, (b) 200, (c) 500 e (d) 1000 píxeis.	21
2.18	Padrão de I/I_0 obtido considerando (a) $L = 8 \mu\text{m}$ e 100 píxeis, (b) $L = 4 \mu\text{m}$ e 200 píxeis, (c) $L = 2 \mu\text{m}$ e 400 píxeis, e (d) $L = 0,2 \mu\text{m}$ e 4000 píxeis.	22
3.1	Fotografias (a) dos diferentes DOEs utilizados e (b) da comparação entre um DOE e uma régua cuja menor divisão da escala é 1 mm.	23
3.2	Esquema da montagem experimental utilizada para caracterizar os DOEs.	24
3.3	(a) Esquema e (b) montagem experimental correspondente para obtenção de potência de saída e I_{PD} em função de I_{LD}	25
3.4	Gráfico da (a) potência de saída e (b) I_{PD} em função de I_{LD}	25
3.5	Esquema da montagem experimental da figura 3.6.	26
3.6	(a) e (b) Montagem experimental realizada para a obtenção da forma do feixe <i>laser</i>	26
3.7	Imagens obtidas através do perfilômetro, distanciadas de $2,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ entre si.	27
3.8	Esquema (a) da área ativa de um díodo laser e (b) da divergência.	27
3.9	Vista de (a) frente e (b) perfil do sistema de laser com lente na distância que permite a colimação do feixe.	29
3.10	Representação da divergência.	29
3.11	Imagens obtidas através do perfilômetro de feixe a diversas distâncias do laser.	29
3.12	Gráfico da (a) potência à saída da lente e (b) I_{PD} em função de I_{PD} para o feixe colimado.	30
3.13	Esboço do padrão esperado utilizando o DOE DE-R 223 e nomeação das coordenadas assumidas para identificação de cada ponto.	31
3.14	(a) Montagem experimental para gerar um padrão e (b) suporte com o DOE.	31
3.15	À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o alvo a uma distância de (a), (b) $21,50 \pm 0,05 \text{ cm}$ e (c),(d) $31,50 \pm 0,05 \text{ cm}$ do DOE DE-R 223.	32
3.16	À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o alvo a uma distância de aproximadamente $5,5 \text{ m}$ do DOE DE-R 223.	32
3.17	Nomeação de pontos de ordens secundárias.	33
3.18	Padrão obtido com o suporte na posição mais extrema do sentido (a) horário e (b) anti-horário.	34
3.19	Padrão obtido com o feixe mais à (a) esquerda e (b) direita do DOE.	35
3.20	Máxima exposição permitida para proteger de dano termal ($\lambda = 400 \text{ a } 700 \text{ nm}$) para quatro α entre $1,5$ e 100 mrad (adaptado de [16]).	35

3.21	Gráfico da evolução da potência central com a distância ao DOE para I_{LD} de (a) 55 mA e 60 mA e (b) 97 mA	36
3.22	(a) Diafragma utilizado e (b) montagem experimental com a sua interposição.	37
3.23	À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o diafragma entre o <i>laser</i> e o DOE e o alvo a uma distância de (a), (b) $21,50 \pm 0,05$ cm e (c),(d) aproximadamente 5,5 m do DOE.	37
3.24	(a) Feixe laser não colimado e (b) padrão obtido com a interposição do DOE.	38
3.25	Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 353 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.	39
3.26	Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 206 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.	39
3.27	Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 241 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.	39
3.28	Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 257 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.	40
3.29	Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 285 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.	40
3.30	Esquema do padrão pretendido a 200 – 300 m com utilização de dois emissores.	41

Lista de Tabelas

1.1	Comparação das características dos LIDAR HDL-64E, Puck VLP-16 e Velarray da Velodyne [27, 29, 30].	6
3.1	Divergência quando $I_{LD} = 55,00 \pm 0,01$ mA e $l = 2,0 \pm 0,5$ mm.	28
3.2	Divergência quando $I_{LD} = 97,00 \pm 0,01$ mA e $l = 2,0 \pm 0,5$ mm.	28
3.3	Divergência, quando $I_{LD} = 55,00 \pm 0,01$ mA e $l = 344,0 \pm 0,1$ cm, para o feixe colimado.	29
3.4	Divergência, quando $I_{LD} = 97,00 \pm 0,01$ mA e $l = 344,0 \pm 0,1$ cm, para o feixe colimado.	30
3.5	Potência e respetiva normalização para cada ponto com o alvo em diferentes distâncias, d_a	33
3.6	Potência dos pontos secundários da figura 3.17, a $d_a = 21,50 \pm 0,05$ cm. . . .	33
3.7	Dados relativos aos diferentes padrões obtidos para a distância de aproximadamente 5,5 m.	40

Lista de Acrónimos

LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SLM	<i>Spatial Light Modulator</i>
DOE	<i>Diffractive Optical Element</i>
LCOS	<i>Liquid Crystal on Silicon</i>

Lista de Símbolos

α	posição angular da fonte
N_p	número total de píxeis
ϕ_j	desvio de fase característico do píxel j
$E_0(x)$	amplitude do campo elétrico a uma distância de x da fonte
r_i	distância entre a fonte i e o ponto P no alvo
k	número de onda
ω	velocidade angular
t	tempo
φ_i	fase inicial da fonte i
d, dN	distância entre as fontes elementares
θ	direção angular
N	número total de fontes elementares
I	densidade de fluxo
I_0	densidade de fluxo em P devido a uma única fonte
L	largura do píxel
I_{LD}	intensidade de corrente que atravessa o díodo <i>laser</i>
I_{PD}	intensidade de corrente que atravessa o fotodíodo
Θ	divergência de um feixe luminoso
D_g	diâmetro do feixe na localização mais afastada da fonte de luz
D_p	diâmetro do feixe na localização mais próxima da fonte de luz
l	distância entre as duas localizações consideradas para o cálculo da divergência do feixe
d_a	distância da fonte de luz ao alvo

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, são apresentados o enquadramento e a motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho, juntamente com o objetivo e a estrutura deste.

1.1 Enquadramento e Motivação

Um LIDAR, do inglês *LIght Detection And Ranging*, é um dispositivo que mede a distância a objetos, tanto em estado estacionário como em movimento [1, 2]. Para além disso, também calcula o tamanho desses objetos e fornece a sua imagem a três dimensões [1, 2].

O sistema LIDAR é tipicamente constituído por um emissor ótico, um sistema de deteção da luz refletida pelos obstáculos e um circuito de cronometragem, sendo o emissor ótico formado pela fonte de luz e outros componentes óticos que definem como o feixe luminoso é emitido, tais como lentes, espelhos ou divisores de feixe [1, 3]. Geralmente, a distância a determinado obstáculo é calculada como a metade do produto da velocidade da luz com o tempo de voo dos fotões (o tempo que os fotões demoram a chegar aos recetores depois da sua emissão) [1, 3]. Um esquema representativo deste princípio de funcionamento é apresentado na figura 1.1.

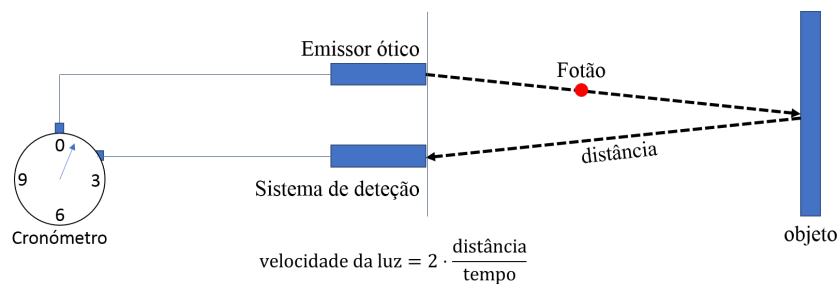


Figura 1.1: Princípio de funcionamento do cálculo da distância entre o LIDAR e um objeto a partir do tempo de voo dos fotões (adaptado de [1, 3]).

O LIDAR não é um dispositivo recente. Uma das suas primeiras utilizações ocorreu no início dos anos 60, quando o *Lincoln Laboratory* do MIT mediu a distância à lua enviando pulsos de 50 J de um *laser* de rubi [4, 5]. Desde essa altura, a tecnologia tem-se desenvolvido, apresentando aplicações em várias áreas, tais como a industrial ou militar [1]. Os LIDARs podem ser utilizados para engenharia reversa (*scanner* a 3D), mapeamento de terreno, con-

trole de processos automáticos, reconhecimento de alvos, guia ou meio de evitar colisões de máquinas e, mais recentemente, condução autónoma [3, 6]. Como os LIDARs são relativamente novos no setor automóvel, a sua implementação continua a ser um tópico de estudo importante, pois são capazes de gerar a imagem a três dimensões e calcular a distância aos obstáculos presentes no cenário envolvente. Mas, os LIDARs existentes noutras áreas são sistemas complexos e caros, não compatíveis com a produção em massa destes dispositivos [1, 4]. Deste modo, o desenvolvimento de LIDARs mais simples a custo reduzido é essencial para a sua aplicação em condução autónoma.

O desenvolvimento da condução autónoma, em que o condutor não intervém na condução, leva à necessidade de um automóvel capaz de detetar possíveis obstáculos e perigos, tais como peões, ciclistas e outros veículos, e de medir a distância a estes [1]. Os automóveis futuros (completamente autónomos) requerem a redundância de múltiplos sistemas do mesmo sensor e a complementariedade de sistemas de diferentes sensores, presentes em várias localizações do veículo [1, 7]. Prevê-se que será necessária a implementação de três sensores diferentes: câmaras, sensores RADAR (do inglês, *Radio Detection And Ranging*) e LIDAR [1, 8]. Em 2017, a Waymo, que começou em 2009 com um projeto do carro autónomo da Google, anunciou o *test drive* dos seus automóveis em ruas públicas sem ninguém no lugar do condutor [7, 9, 10]. Foram integrados sistemas de câmaras, RADAR e LIDAR em carrinhas Fiat Chrysler, cuja disposição se encontra esquematizada na figura 1.2 [7]. De referir que, por exemplo, até os vários sistemas LIDAR integrados nas carrinhas são diferentes entre si dependendo do fim a que se destinam [7].

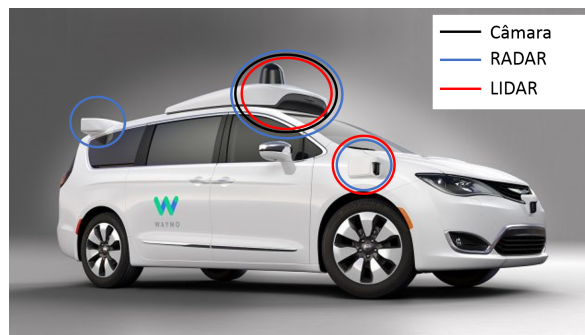


Figura 1.2: Esquema da disposição dos sistemas de câmaras, RADAR e LIDAR nos automóveis da Waymo (adaptado de [7, 9]).

Destes três sensores, as câmaras são as únicas que permitem identificar cores e texturas [11]. Para além disso, têm cada vez maior resolução e menor custo, mas os seus resultados são afetados pelas condições climáticas e pelas variações da luz [11]. As câmaras podem ser utilizadas para reconhecimento de veículos, peões, marcas de terreno e alguns sinais de trânsito, tal como os de limite de velocidade [11]. Os sensores RADAR são já utilizados há muitos anos na indústria automóvel [11]. Estes utilizam ondas rádio para detetar e localizar objetos e são computacionalmente mais leves e menos sensíveis às condições climáticas (nevoeiro, chuva, neve...) [11]. São dispositivos baratos, mas menos precisos angularmente que o LIDAR quando perdem de vista o veículo alvo nas curvas, levando a erros no cálculo da distância de separação [11]. Mas, ao contrário dos LIDARs, conseguem determinar de forma precisa a velocidade de um objeto em movimento usando o efeito de Doppler [11]. Os LIDARs calculam a distância aos obstáculos e também conseguem prever o seu tamanho, por isso são utilizados

para gerar mapas de alta resolução das imediações com os pedestres, veículos, etc [2]. Não são afetados pelas condições de iluminação, mas são mais sensíveis às condições climáticas do que os RADARs [2]. O desenvolvimento de câmaras e sensores RADAR está muito mais amadurecido do que o dos sistemas LIDAR, que ainda se apresentam como um desafio em termos técnicos e comerciais [1].

Em termos técnicos, os sistemas LIDAR mecânicos são, atualmente, os mais utilizados para fazer o varrimento de um cenário [12, 13]. Para alterar a direção de um feixe luminoso, recorrem, por exemplo, a prismas de Risley, à rotação de espelhos ou da cápsula em que o LIDAR se encontra [3, 12, 14]. Mas, com a integração em automóveis em vista, é necessário reduzir o número de partes móveis do sistema. Um sistema sem qualquer parte móvel (não mecânico) apresenta-se imune à vibração, sem desgaste mecânico, mais leve, compacto e barato [6, 12, 13]. Para além disso, também poderá ser mais rápido na medida em que não está limitado pela inércia do sistema e consumir menos energia [12, 13]. Uma alternativa que diminui o número de partes móveis é a utilização de microespelhos, que permitem direcionar o feixe a partir apenas da oscilação de um microespelho [8]. Apesar de reduzir o número e o volume de peças em rotação, continua a ser sensível a vibrações, apresentando problemas associados à manutenção da sua calibração [8, 12, 13]. Para o desenvolvimento de sistemas não mecânicos, foram já exploradas várias abordagens incluindo a utilização de matrizes de microlentes, modulação eletro-ótica e acusto-ótica da luz [3, 12, 13]. Para além do varrimento, existe o LIDAR *flash*, que permite obter uma imagem do cenário a partir de um só pulso [8]. Como a potência do pulso luminoso é dispersa por todo o cenário, é necessário um feixe bastante potente e um recetor muito sensível para possibilitar um grande alcance [8]. Porém, uma potência elevada coloca problemas a nível de segurança ocular [8].

Os feixes luminosos de um *laser* podem ser perigosos, particularmente para os olhos. Mesmo que a intensidade da luz seja moderada, a radiação pode ser focada pela lente do olho, fazendo com que se concentre numa pequena região da retina, o que pode levar a danos permanentes nesta [15]. Deste modo, a integração de LIDARs em automóveis implica a tomada de determinadas normas de segurança. Existem diversas normas que associam classes aos dispositivos de acordo com o estabelecido em termos de segurança ocular [15]. Uma das mais importantes é a norma internacional de segurança ocular da Comissão Eletrotécnica Internacional (em inglês, *International Electrotechnical Commission*, IEC), utilizada nesta dissertação [15]. Seguindo esta norma, o LIDAR deve ser de classe 1, ou seja, a radiação da luz *laser* acessível não é perigosa em qualquer condição razoável de utilização [16]. A correspondência a cada classe depende da potência do *laser*, da qualidade do feixe (normalmente é considerada como uma medida do quanto um feixe *laser* pode ser focado em certas condições [17]), do comprimento de onda e da acessibilidade às áreas em que a intensidade da luz pode causar danos [15, 16]. Por exemplo, até um *laser* de elevada potência pode ser classe 1, desde que não exista o risco de a radiação com intensidade superior ao limite estabelecido como seguro se encontrar fora da cápsula do dispositivo [15].

Tendo em conta as considerações apresentadas, no desenvolvimento de um LIDAR, o comprimento de onda e a potência da luz a utilizar são pontos importantes a ponderar. Os feixes têm de ser seguros e invisíveis para não perturbar as pessoas no meio envolvente. Logo após os limites da cápsula, a potência destes tem de ser baixa o suficiente para que não ultrapasse a máxima exposição permitida para a classe 1. Porém, a sua energia também tem de ser suficiente para que os LIDARs apresentem um longo alcance e detetem os obstáculos a tempo de serem tomadas as medidas necessárias para evitar acidentes. Por exemplo, é indicado que os LIDARs destinados à condução autónoma apresentem um alcance entre os 200 e 300

metros para que ao circular numa autoestrada, onde à partida apresentam maior velocidade, parem em segurança quando o LIDAR identificar um obstáculo [1, 4]. A sensibilidade do olho humano à luz depende do seu comprimento de onda, cuja relação é apresentada na figura 1.3. Em condições normais de luminosidade (visão fotópica), o olho humano apresenta maior sensibilidade à luz de comprimento de onda de aproximadamente 550 nm [18]. Em ambientes com baixa luminosidade (visão escotópica), a máxima sensibilidade à luz encontra-se em torno dos 500 nm [18]. À medida que o comprimento de onda da luz se afasta destes máximos, a sensibilidade do olho humano a esta diminui, considerando-se geralmente que a sensibilidade do olho humano está entre os 400 e os 700 nm [18]. Deste modo, o LIDAR deve utilizar luz de comprimentos de onda superiores aos 700 nm, o que corresponde à zona do infravermelho.

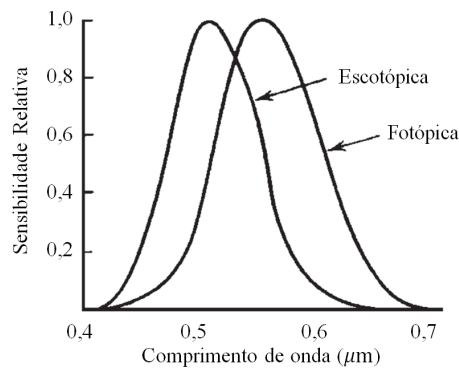


Figura 1.3: Sensibilidade relativa do olho a diferentes comprimentos de onda na visão fotópica e escotópica. Adaptado de [18].

A luz de comprimentos de onda desde o começo do infravermelho até os 1400 nm, aproximadamente, penetra no olho, chegando à retina, tal como a luz visível [15]. A posição angular da fonte de luz, α , é o ângulo subtendido por esta quando visto num determinado ponto do espaço e um parâmetro importante para se determinar a máxima exposição permitida [16]. Tal como se pode verificar na figura 1.4, este ângulo determina o tamanho da fonte na retina. No gráfico da figura 1.5a, está apresentada a dependência da irradiância máxima permitida com o tempo de exposição a esta, para diferentes comprimentos de onda e considerando α inferior a 1,5 mrad. Como se pode verificar, o tempo de duração da exposição influencia a potência máxima permitida, pois para períodos de exposição muito curtos, a máxima exposição permitida é superior aos mais longos. Também com o aumento do comprimento de onda, a irradiância máxima permitida aumenta.

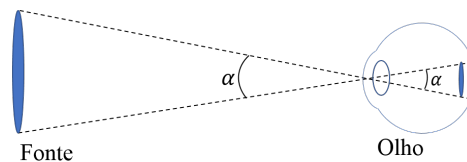


Figura 1.4: Esquema representativo da posição angular de uma fonte de luz, α . Baseado em [19].

Outro ponto a ter em consideração na escolha do comprimento de onda da luz a utilizar

no LIDAR é a absorção atmosférica. Na figura 1.5b, é apresentado um exemplo de um espectro de irradiação solar ao nível do mar, em que se observa descidas de intensidade da radiação em torno dos 760 nm devido à absorção da radiação por parte do oxigénio atmosférico [20], em torno dos 940 nm [20] e 1100 nm devido à absorção por parte da água. A partir dos 1400 nm aproximadamente, a irradiância solar é baixa mesmo sem considerar a absorção atmosférica. Considerar zonas do espectro em que a luz solar apresenta uma descida de intensidade, diminui a interferência da luz solar na deteção do sistema LIDAR, permitindo a utilização de uma potência menor, necessária para a segurança ocular.

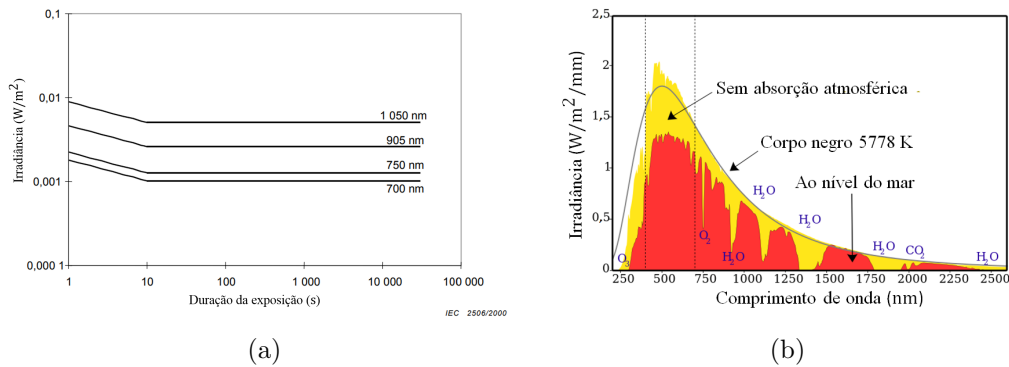


Figura 1.5: (a) Máxima exposição permitida para exposição ocular direta (considerando α inferior a 1,5 mrad) para a luz de comprimentos de onda de 700, 750, 905 e 1050 nm (adaptado de [16]) e (b) Irradiância solar em que os compostos responsáveis pela absorção da luz num determinado comprimento de onda encontram-se a azul (adaptado de [21]).

Tipicamente, são utilizados, em LIDARs, díodos *laser* que emitem luz de comprimento de onda de 905 nm, pois são baratos e podem ser utilizados detetores de silício no sistema de deteção, que também têm um custo reduzido [4]. Como referido, a potência dos pulsos luminosos tem de ser controlada de forma a eliminar o risco de dano da retina. Porém, surgiu a alternativa de utilizar luz de comprimento de onda de 1550 nm [4], que é mais absorvida pela lente do olho, menos sensível a danos que a retina [22]. A utilização de luz deste comprimento de onda permite a utilização de pulsos mais potentes e assim detetar obstáculos a maior distâncias [4]. No entanto, os sensores para a luz deste comprimento de onda são mais caros do que os de silício [23], o que implica uma ponderação entre a limitação de potência e o preço envolvido.

Volta-se assim à questão dos custos do LIDAR, em que a Velodyne, entre outras empresas, tem vindo a apresentar diversas alternativas no mercado. Em 2009, o LIDAR utilizado no primeiro protótipo de automóvel autónomo da Google, e integrado em carros Toyota Prius, foi o HDL-64E da Velodyne (figura 1.6a) [24]. Era o maior componente do automóvel e tinha um custo de 75000\$ [25], preço que pode ultrapassar o valor do veículo. Para além disso, é um LIDAR mecânico, que recorre à rotação da cápsula para fazer um varrimento horizontal de 360° do ambiente que o rodeia [25]. Nos últimos anos, têm surgido outros LIDARs mais baratos e também com um tamanho menor. A Velodyne começou também a comercializar outros LIDARs mecânicos, tal como o LIDAR Puck (VLP-16) em 2016, desenvolvido para a produção em massa, (figura 1.6b) com um custo inicial de 8000\$ [24, 25], valor que foi reduzido para metade em 2018 [26]. Ambos os LIDARs emitem milhares de pulsos por segundo,

fornecendo uma nuvem de pontos do cenário em 3D, mas o último referido tem um menor alcance e uma menor resolução do que o HDL-64E devido ao menor número de emissores e detetores integrados [25]. Em 2017, a Velodyne anunciou também o seu LIDAR não rotativo (*laser* fixo), o Velarray, que apesar de não obter uma imagem do cenário ao longo de 360° na horizontal, mas sim de 120°, é uma alternativa apta para a condução autónoma, barata (na ordem das centenas de dólares) quando produzida em massa e de pequenas dimensões [27]. Na tabela 1.1, são apresentadas algumas características destes três dispositivos.

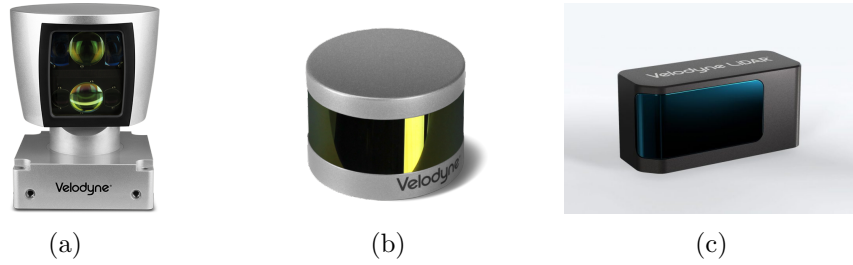


Figura 1.6: LIDAR (a) HDL-64E [14], (b) Puck VLP-16 [28] e (c) Velarray [27] da Velodyne.

Características	HDL-64E	Puck VLP-16	Velarray
Campo de visão (horizontal)	360°	360°	120°
Campo de visão (vertical)	26,9°	30°	35°
Alcance	120 m	100 m	200 m
Dimensões (mm ³)	$\approx 203 \times 177,8 \times 283$	$\approx 103 \times 103 \times 72$	$125 \times 50 \times 55$

Tabela 1.1: Comparação das características dos LIDAR HDL-64E, Puck VLP-16 e Velarray da Velodyne [27, 29, 30].

Contudo, a investigação em LIDAR, com aplicação na condução, continua a ser importante e necessária para o desenvolvimento, otimização e redução do custo de fabrico dos sistemas LIDAR.

1.2 Objetivo

Tendo por base as considerações escritas na secção anterior, o objetivo do trabalho é desenvolver um emissor ótico não mecânico para integração em LIDAR. Este emissor deverá ser fácil de implementar, barato, energeticamente eficiente e cumprir normas de segurança específicas para que a sua integração em veículos seja possível, isto é, ser classe 1 em termos de segurança ocular. Além disso, as características do dispositivo devem manter-se constantes quando exposto a diferentes condições (temperatura, chuva, nevoeiro...) e reconhecer objetos entre os 200 e os 300 m de distância. São consideradas duas abordagens: a mudança de direção do feixe luminoso, como representado na figura 1.7a, e a divisão deste em vários, como representado na figura 1.7b.

O comprimento de onda que se pretende utilizar no emissor a desenvolver é o de 760 nm. Apesar de a exposição máxima permitida da radiação com este comprimento de onda ser menor do que nos 905 nm e 1550 nm (como se infere pelo gráfico da figura 1.5a), a escolha

deste prende-se no pico de absorção da radiação solar por parte do oxigénio atmosférico nos 760 nm e na existência de detetores sensíveis e baratos da luz neste comprimento de onda.

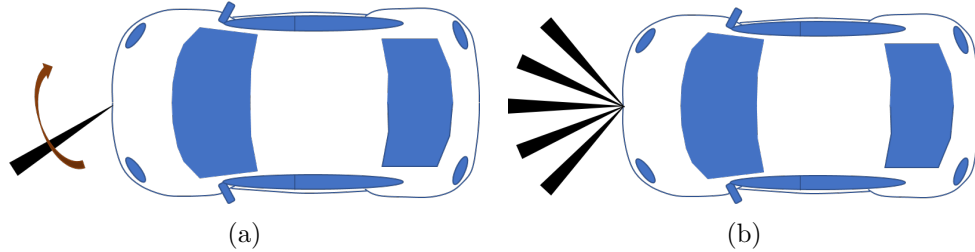


Figura 1.7: Esquema das hipóteses a estudar: (a) mudança de direção do feixe e (b) a divisão em vários feixes.

Para a primeira abordagem proposta, a potência da luz deve concentrar-se apenas no feixe a direcionar. Na segunda, a potência divide-se entre os vários feixes de forma uniforme. Como já referido, a potência do feixe inicial pode ser elevada desde que, fora dos limites da cápsula do emissor, cada ponto luminoso apresente níveis seguros de potência. Esta segunda abordagem surge como alternativa ao LIDAR *flash*, pois a energia não será dispersa por todo o cenário, fazendo com que, para a mesma potência de luz inicial, o emissor de pontos discretos apresente um maior alcance.

Deste modo, pretende-se avaliar o comportamento e a viabilidade da utilização de dois componentes para o desenvolvimento de um emissor para LIDAR: o modulador espacial de luz (do inglês *spatial light modulator*, SLM) e elemento ótico difrativo (do inglês *diffraction optical element*, DOE) de material polimérico. O princípio de funcionamento do primeiro baseia-se nas propriedades eletro-ópticas dos cristais líquidos, tornando-se uma alternativa não mecânica e programável para a manipulação do feixe luminoso. É assim proposto para direcionar o feixe ou dividi-lo em vários. O segundo está desenhado para dividir um feixe luminoso em vários feixes, sendo uma alternativa não mecânica e barata para a obtenção de vários pontos para mapear um dado cenário.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos, começando pela introdução ao trabalho concretizado. No segundo capítulo, é descrito o estudo teórico realizado acerca do funcionamento do SLM, com o objetivo de validar a sua integração numa montagem experimental que leve à mudança da direção do feixe luminoso ou à sua divisão em vários feixes. São apresentados o modelo teórico desenvolvido, os resultados obtidos a partir deste para diversas características iniciais e a análise e discussão destes. No terceiro capítulo, é descrito o trabalho experimental realizado de forma a validar a implementação de DOEs para dividir o feixe luminoso em vários outros feixes. Apresenta-se a caracterização dos DOEs, a comparação dos diferentes padrões obtidos e a análise e discussão dos resultados. As conclusões retiradas dos dois estudos e propostas de trabalho de futuro são apresentadas no último capítulo.

Capítulo 2

Modulador espacial de luz: estudo teórico

Neste capítulo, é descrito o estudo realizado de forma a avaliar a viabilidade da utilização de um modulador espacial de luz LCOS (cristais líquidos em silício) num emissor ótico para LIDAR. Foram consideradas duas abordagens: mudança de direção e divisão de um feixe luminoso. Como referido, este dispositivo permite modular a luz não mecanicamente, não apresentando as desvantagens associadas aos sistemas mecânicos. É um dispositivo programável que, para modular a luz nele incidente, necessita que lhe seja indicado o desvio de fase a introduzir em cada zona da matriz de cristais líquidos, que é definido pela diferença de potencial aplicada. Após uma introdução acerca do funcionamento do SLM, é apresentado o modelo teórico desenvolvido para gerar padrões a partir das características deste. Para avaliar a mudança de direção, são estudados os padrões obtidos a partir de três distribuições de fase diferentes ao longo de uma direção do SLM. Para avaliar a divisão do feixe, são estudados os padrões calculados a partir de diferentes larguras de píxel. São também apresentadas as conclusões retiradas em cada caso.

2.1 Modulador espacial de luz

Nos últimos anos, a tecnologia LCOS tem sido desenvolvida e aplicada em exibição de imagem e vídeo [31]. Mas, a partir das características eletro-óticas dos cristais líquidos, esta também é utilizada em moduladores espaciais de luz LCOS que modulam a fase da luz que neles incide [31].

Os cristais líquidos são um estado de matéria que se situa entre o estado sólido e o líquido [32]. As moléculas que constituem os cristais líquidos apresentam-se ordenadas em termos de orientação (tal como nos cristais), mas não dispõem de ordem a nível posicional (tal como os fluídos no estado líquido) [33]. Os cristais líquidos considerados são os calamíticos, cujas moléculas apresentam uma forma alongada [33, 34]. Para além disso, estes podem apresentar diferentes fases, tais como:

- Fase nemática, em que a posição das moléculas é aleatória, mas estas tendem a estar paralelas umas às outras (figura 2.1a);
- Fase esméctica, em que as moléculas estão paralelas umas às outras e ordenadas segundo planos, apresentado ordem posicional numa só direção (figura 2.1b) [32, 33].

A propriedade mais importante dos cristais líquidos na manipulação da fase da luz é a birrefringência [31]. Esta propriedade está associada à apresentação de índices de refração diferentes consoante a orientação das moléculas do cristal líquido [31]. Para além disso, as moléculas também apresentam anisotropia elétrica, isto é, consoante o campo elétrico a que estas estão expostas, elas alinham-se numa determinada direção [35]. Alterar o campo elétrico a que estão sujeitas altera a sua orientação, o que leva a que a luz com determinada polarização passe por meios com diferentes índices de refração, o que induz uma diferença de percursos óticos efetivos, dados pelo produto entre a distância percorrida e o índice de refração do meio [35, 36]. É a diferença entre os percursos óticos que causa a interferência entre os raios luminosos [36] e, conseqüentemente, a capacidade de controlar a luz que sai do SLM.

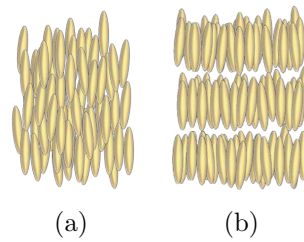


Figura 2.1: Esquema da disposição das moléculas nas fases (a) nemática e (b) esmética [34].

A fase esmética tem um grau de ordenação superior à nemática, o que implica uma maior semelhança com o estado sólido [31]. A fase esmética, que ocorre frequentemente a temperatura inferior à nemática, tem uma maior viscosidade, apresentando um maior tempo de resposta [31]. Para além disso, para distorcer estruturas esméticas são necessárias diferenças de potencial elevadas e, geralmente, necessitam também de aquecimento [31]. Por isso, é a fase nemática que é a mais utilizada na modulação da luz pois a sua birrefringência é facilmente e continuamente manipulada por um campo elétrico [31].

O SLM é constituído por uma matriz de píxeis de um cristal líquido, sendo possível aplicar uma determinada diferença de potencial média em cada um destes píxeis. Dependendo da voltagem aplicada, as moléculas do cristal líquido inclinam-se com uma dada orientação devido à sua anisotropia elétrica. No esquema da figura 2.2, está representada a alteração da inclinação das moléculas de cristal líquido em quatro píxeis, cada um com um determinado campo elétrico aplicado. As diferentes inclinações variam o índice de refração de píxel para píxel, fazendo com que cada píxel altere a fase da luz que o atravessa de forma diferente.

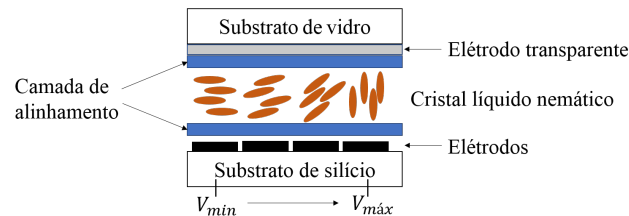


Figura 2.2: Esquema da matriz de píxeis com moléculas de um cristal líquido, com campo elétrico aplicado (baseado em [37]).

O SLM reflete ou transmite a luz que nele incide e modula-a sem que seja necessário

um sistema mecânico. Assim, este torna-se insensível a situações que afetam os sistemas mecânicos tais como vibrações e inércia.

O SLM disponível no laboratório do Instituto de Telecomunicações é o SLM PLUTO-TELCO-013, que se apresenta como na figura 2.3. Tal como as restantes versões do SLM PLUTO, este é constituído por uma matriz de 1920×1080 píxeis de cristais líquidos, com uma largura de $8 \mu\text{m}$ cada (apresentando uma área ativa de $15,36 \times 8,64 \text{ mm}$) e funciona em modo refletivo [38]. A versão do SLM considerada é indicada para a luz numa gama de comprimentos de onda de 1400 nm a 1700 nm e possibilita um desvio de fase até $3,5\pi$ [38].

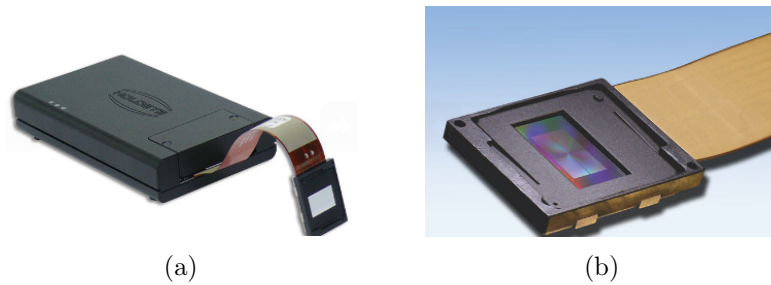


Figura 2.3: (a) *Driver* do SLM PLUTO e (b) ampliação na sua zona onde se encontra o SLM. [38]

Uma montagem experimental possível para o SLM PLUTO é a que se encontra na figura 2.4. O feixe proveniente de uma fonte de luz é colimado pela lente e depois é refletido e modulado pelo SLM, apresentando um determinado padrão no alvo. Como o objetivo da montagem é identificar obstáculos a grandes distâncias, o alvo está afastado dos restantes componentes, encontrando-se no campo longínquo [39].

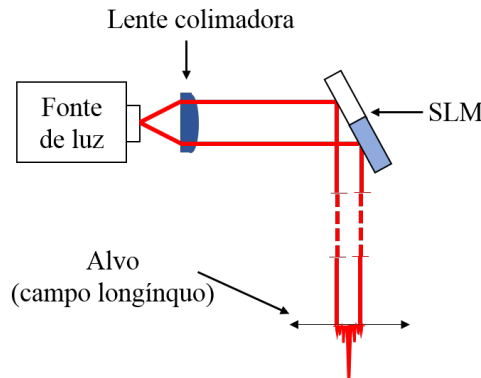


Figura 2.4: Esquema de uma montagem experimental possível para obtenção dos padrões pretendidos com o SLM.

2.2 Modelo teórico

Como referido anteriormente, a versão do SLM PLUTO disponível em laboratório funciona para feixes de luz de comprimento de onda entre os 1400 nm e os 1700 nm . É uma gama que se situa fora do espetro do visível, o que dificulta tanto o alinhamento como a observação

dos diversos padrões. Para além disso, é necessário indicar qual o desvio de fase a aplicar em cada píxel para que o SLM modele a luz, o que tornou necessário realizar-se primeiro um estudo teórico de forma a gerar padrões de luz tendo em conta diferentes desvios de fase introduzidos na luz que atravessa cada píxel. Torna-se uma forma mais eficiente de se obter e estudar diversos padrões numa primeira abordagem, pois não necessita do tempo despendido experimentalmente em alinhamentos e calibrações dos componentes da montagem.

O modelo desenvolvido baseia-se na fase com que a luz sai dos diversos píxeis do SLM, pois experimentalmente é o desvio de fase que se altera através da aplicação de diferentes voltagens nos cristais líquidos. Na figura 2.5, encontra-se a disposição dos N_p píxeis, cada um com um desvio de fase característico, ϕ_j , denotado por uma cor. Não se considerou as condições de fronteira associadas ao obstáculo em causa nem se partiu diretamente das equações de Maxwell [36, 39]. Deste modo, o modelo foi baseado em princípios aproximados.

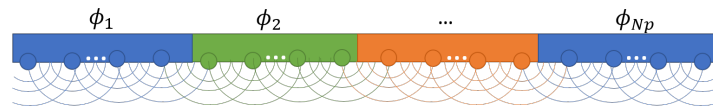


Figura 2.5: Esquema do qual partiu o desenvolvimento do modelo apresentado.

Esquemáticamente, o princípio de Huygens é particularmente importante, porque enuncia que cada ponto de uma frente de onda pode ser visto como uma fonte esférica secundária, sendo a frente de onda, a qualquer instante, dada pela envolvente dessas fontes secundárias, tal como representado na figura 2.6 [36, 39]. Nesta figura, é possível observar como uma frente de onda pode ser aproximada a um conjunto de várias fontes esféricas secundárias. Mas, como este princípio não tem em conta todas as características das ondas secundárias, nomeadamente a interferência entre estas [39], torna-se apenas interessante numa primeira abordagem. O princípio que já tem em conta a interferência é o princípio de Huygens-Fresnel, que diz que *cada ponto de uma frente de onda não desobstruída constitui, em qualquer instante, uma fonte de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária) e que a amplitude do campo ótico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição de todas essas ondas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas)* [36, 39].

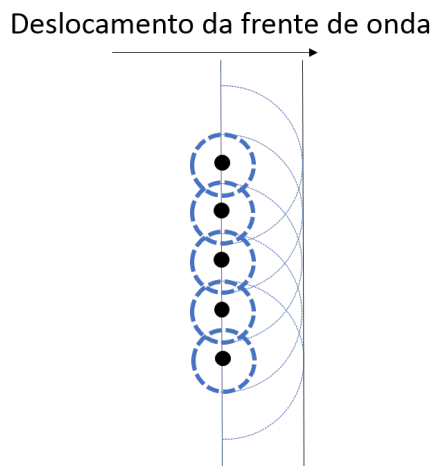


Figura 2.6: Esquema do princípio de Huygens.

O objetivo deste estudo é fazer o varrimento de um cenário segundo uma direção (a uma dimensão), pois pretende-se observar apenas o deslocamento do máximo. Assim, foi possível reduzir o tempo de cálculo de padrões, pois o número de fontes a considerar é bastante inferior do que se se considerasse duas dimensões. Deste modo, assumiu-se a alteração dos índices de refração segundo apenas uma direção. A frente de onda refletida pelo SLM é constituída por diversas fontes elementares dispostas ao longo deste, segundo um determinado eixo. As fontes elementares que estão no mesmo píxel têm a mesma fase inicial, que difere da fase inicial das fontes elementares dos píxeis adjacentes. O campo elétrico de cada fonte num ponto P do alvo é dado por [39]:

$$E_i = E_0(r_i)e^{j(kr_i - \omega t + \varphi_i)}, \quad (2.1)$$

em que $E_0(x)$ é a amplitude a uma distância de x metros da fonte, r_i é a distância entre a fonte i e o ponto P , k é o número de onda, ω é a velocidade angular, t é o tempo decorrido e φ_i a fase inicial da fonte i .

Considerou-se o regime da difração de Fraunhofer ou de campo longínquo, pois a finalidade do estudo implica que o alvo, ou plano de observação, se encontre afastado do obstáculo, neste caso, o SLM. Assim, assumiu-se que a amplitude das ondas esféricas são iguais entre si, pois percorreram distâncias aproximadamente iguais quando chegam ao alvo. Num dado ponto P , as amplitudes das ondas secundárias são [39]:

$$E_0(r_1) = E_0(r_2) = \dots = E_0(r_N) = E_0(R), \quad (2.2)$$

em que N é o número de fontes elementares.

O campo elétrico de cada fonte no ponto P torna-se [39]:

$$E_i = E_0(R)e^{j(kr_i - \omega t + \varphi_i)}. \quad (2.3)$$

No ponto P , o campo elétrico total resulta da soma dos campos elétricos das diferentes ondas dadas na expressão 2.3, ficando [39]:

$$\tilde{E} = E_0(R)e^{j(kr_1 - \omega t + \varphi_1)} + E_0(R)e^{j(kr_2 - \omega t + \varphi_2)} + \dots + E_0(R)e^{j(kr_N - \omega t + \varphi_N)}. \quad (2.4)$$

Isolando as constantes, a expressão 2.4 torna-se:

$$\tilde{E} = E_0(R)e^{-j\omega t} \times \left[e^{j(kr_1 + \varphi_1)} + e^{j(kr_2 + \varphi_2)} + \dots + e^{j(kr_N + \varphi_N)} \right]. \quad (2.5)$$

Devido à disposição linear das fontes e, analisando a figura 2.7, chega-se a:

$$r_2 - r_1 = d \cos \theta, \quad r_3 - r_1 = 2d \cos \theta$$

e:

$$r_N - r_1 = (N - 1)d \cos \theta, \quad (2.6)$$

em que d é a distância entre as fontes elementares e θ é a direção angular considerada.

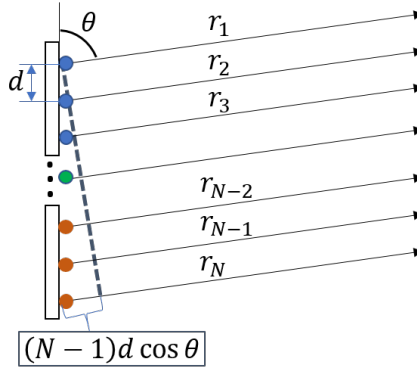


Figura 2.7: Esquema com a disposição das fontes elementares, em que a cor indica a diferença de fase imposta devido aos índices de refração dos píxeis.

Tirando partido da disposição das fontes, a expressão 2.5 torna-se:

$$\begin{aligned}\tilde{E} &= E_0(R)e^{-j\omega t}e^{ikr_1} \times \left[e^{j(\varphi_1)} + e^{j(k(r_2-r_1)+\varphi_2)} + \dots + e^{j(k(r_N-r_1)+\varphi_N)} \right] \\ &= E_0(R)e^{-j\omega t}e^{jkr_1} \times \left[e^{j(\varphi_1)} + e^{j(kd \cos \theta + \varphi_2)} + \dots + e^{j((N-1)kd \cos \theta + \varphi_N)} \right].\end{aligned}\quad (2.7)$$

A expressão 2.7 pode ser apresentada como:

$$\tilde{E} = E_0(R)e^{-j\omega t}e^{jkr_1} \sum_{i=1}^N e^{j((i-1)kd \cos \theta + \varphi_i)}.\quad (2.8)$$

A distribuição da densidade de fluxo, I , sobre o padrão obtido devido às N fontes pontuais, é proporcional a $\tilde{E}\tilde{E}^*/2$, sendo dada por [39]:

$$I = I_0 \left| \sum_{i=1}^N e^{j((i-1)kd \cos \theta + \varphi_i)} \right|^2, \quad (2.9)$$

em que I_0 é a densidade de fluxo em P devido a uma única fonte.

Os padrões calculados encontram-se normalizados fazendo com que o valor da constante I_0 não seja importante. A normalização do padrão é obtida através de:

$$|F| = 10 \log_{10} \left(\frac{I(\theta)}{I(\theta)_{\max}} \right) \text{ (dB)}. \quad (2.10)$$

Para a obtenção dos padrões, implementou-se as equações 2.9 e 2.10 em *Matlab*. Para todos os padrões, gerou-se os valores de θ entre 0 e π , que correspondem à largura angular considerada no alvo. Para cada caso, definiu-se um dado N , k e d como características iniciais. O valor de N depende do número de fontes pontuais consideradas por píxel (discretização das fontes elementares, que é estudada na subsecção 2.2.1) e do número de píxeis. O valor de k considerado é calculado considerando um comprimento de onda de 760 nm. Estas características são necessárias para o cálculo de I/I_0 da expressão 2.9 em função de θ . Seguidamente, normalizou-se os resultados obtidos (através da divisão pelo máximo) e traçou-se o $|F|$ da equação 2.10 em função de θ .

2.2.1 Discretização das fontes elementares

Como a luz tem uma natureza contínua, começou-se por definir o número de fontes elementares necessárias ao longo de cada píxel, por outras palavras, a distância máxima entre as fontes elementares, dN , para que os resultados não dependessem significativamente da discretização efetuada. A distância entre as fontes elementares num píxel é dada por:

$$dN = \frac{L}{N}, \quad (2.11)$$

em que L é a largura do píxel e N o número de fontes elementares dispostas ao longo deste.

Deste modo, calculou-se um padrão para um píxel com apenas uma fonte elementar ($N = 1$) e outro padrão para um píxel com duas fontes elementares ($N = 2$). Subtraiu-se os padrões obtidos e retirou-se o valor máximo do absoluto dessa subtração, $|dF|_{\text{máx}}$, que ficou associado à distância $dN = L/2$. De seguida, associa-se à distância $dN = L/3$ o $|dF|_{\text{máx}}$ que se obtém através da diferença dos padrões relativos a três e duas fontes elementares. Um exemplo destes passos encontra-se na figura 2.8. Subtraiu-se o padrão relativo às três fontes elementares (a verde na figura 2.8a) ao padrão das duas fontes elementares (a azul figura 2.8a), obtendo-se a curva do valor absoluto da subtração (figura 2.8b). Retirou-se o novo $|dF|_{\text{máx}}$, que corresponde ao máximo do gráfico da figura 2.8b (neste caso, à volta dos 74 dB, valor que fica associado a $dN = 8/3 \approx 2,7 \mu\text{m}$).

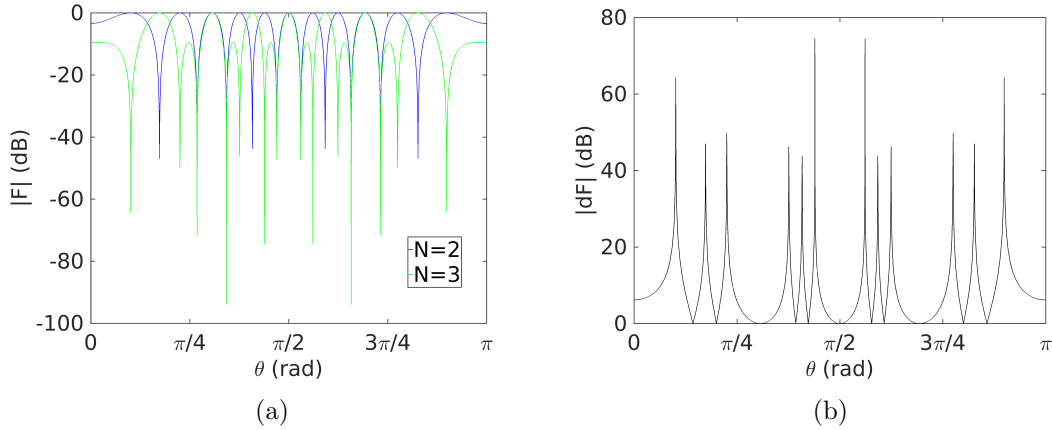


Figura 2.8: (a) Sobreposição dos padrões com $N = 2$ e $N = 3$ e (b) módulo da diferença entre estes para $L = 8 \mu\text{m}$.

Repetiu-se o procedimento para vários valores de N progressivamente maiores. A figura 2.9 apresenta os resultados para $N = 217$ e 336 , em que se observa a similaridade dos padrões, sem nenhuma diferença significativa entre eles. Apresentam assim um $|dF|_{\text{máx}}$ de aproximadamente 10^{-2} dB, valor associado à distância $dN = 8/336 \approx 2,4 \times 10^{-2} \mu\text{m}$.

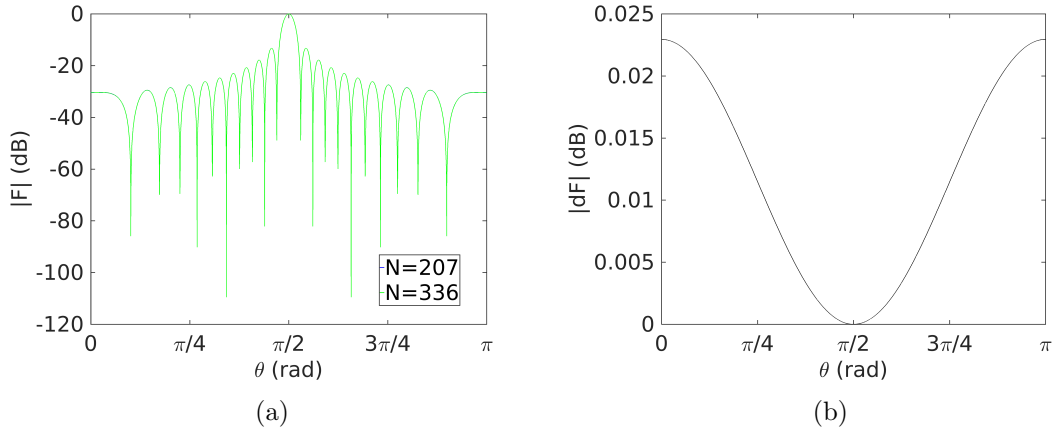


Figura 2.9: (a) Sobreposição dos padrões com $N = 207$ e $N = 336$ e (b) módulo da diferença entre estes para $L = 8 \mu\text{m}$.

Com os resultados obtidos de $|dF|_{\text{máx}}$ para cada dN , traçou-se o gráfico da figura 2.10, a partir do qual se conclui que, para a largura de píxel de $8 \mu\text{m}$, os padrões obtidos são similares para distâncias entre fontes inferiores a 10^{-8} m (N superior a 800 fontes elementares). Neste gráfico também estão presentes os resultados obtidos para larguras de píxel diferentes de $8 \mu\text{m}$, devido à eventualidade de ser necessário considerar outras larguras de píxel no futuro.

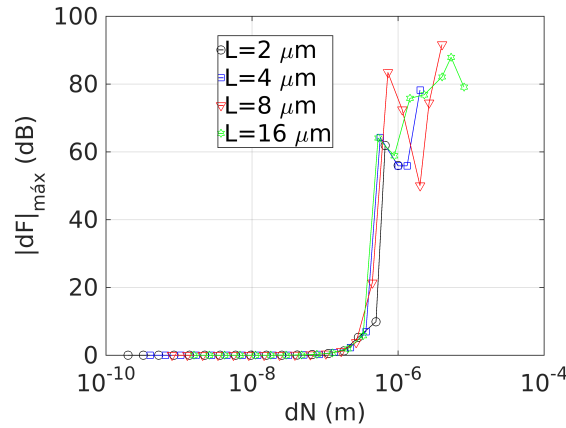


Figura 2.10: Gráfico de $|dF|_{\text{máx}}$ em função de dN para diferentes larguras de píxel.

No conjunto dos gráficos obtidos, retira-se 10^{-8} m como a máxima distância a partir da qual os padrões são similares entre si fazendo com que se possa utilizar sempre esse espaçamento de fontes, qualquer que seja a largura do píxel. Todos os estudos realizados daqui para a frente foram efetuados considerando um espaçamento entre as fontes elementares de 10^{-8} m .

2.3 Casos de estudo

Seguidamente, são apresentados os diferentes padrões calculados recorrendo ao método referido no final da secção 2.2.

De referir que, em todos os padrões, foi traçada uma reta horizontal nos -3 dB, a vermelho, que corresponde à zona em que a potência decai para metade da da máxima. Assim, é possível ter uma melhor perceção se a potência está concentrada em determinado máximo, sendo o único acima da linha traçada, ou bem distribuída, existindo vários máximos acima da linha.

2.3.1 Estudo do SLM PLUTO

Para um estudo inicial, considerou-se 100 píxeis em vez dos 1920 ou 1080 píxeis (dependendo da direção escolhida). O número de píxeis afeta o número de fontes que estão a interferir, aumentando o tempo necessário para gerar os padrões. Dependendo das conclusões retiradas a partir dos 100 píxeis, avalia-se a necessidade de fazer cálculos com maior número de píxeis. Como a largura do píxel é de $8 \mu\text{m}$ e a distância entre as fontes elementares assumida é de 10^{-8} m, cada píxel é visto como um conjunto de 800 fontes elementares com a mesma fase inicial. Assim, o conjunto de 100 píxeis está associado a um total de 8×10^4 fontes elementares.

Alteração da direção do feixe luminoso

Como já referido, o objetivo inicial é avaliar a possibilidade da alteração da direção de um feixe luminoso, a partir da alteração do índice de refração dos píxeis de cristais líquidos. No modelo desenvolvido, os diferentes índices de refração traduzem-se em diferentes fases iniciais, por isso foram testadas diversas disposições de fases iniciais de cada fonte elementar ao longo dos 100 píxeis para analisar a dependência dos padrões calculados. Na figura 2.12, são apresentadas três disposições de fases iniciais que levaram ao deslocamento do máximo, que é central quando a fase inicial de todas as fontes elementares é nula (figura 2.11).

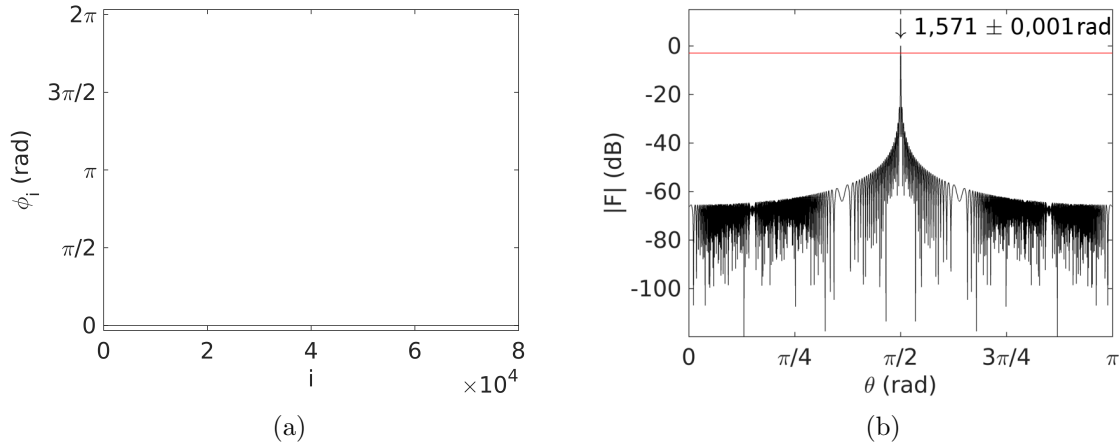


Figura 2.11: (a) Disposição da fase nula de cada fonte elementar i ao longo de 100 píxeis dando origem a (b).

O máximo dos gráficos das figuras 2.12b e 2.12d estão deslocados $0,025$ rad ($1,43^\circ$) e $0,050$ rad ($2,86^\circ$) para a esquerda do máximo da figura 2.11b, respetivamente. O padrão da figura 2.12f é obtido através de uma disposição de fases inversa à da que deu origem à da figura 2.12d, apresentando o mesmo deslocamento em relação ao centro, só que para o lado direito. Conclui-se que é possível deslocar o máximo central, mas a alteração da disposição das

fases iniciais faz com que apareçam outros ordens de difração, que se traduzem nos máximos secundários observados, que levam à perda de eficiência. Neste caso, a única potência a utilizar é a do máximo central, por isso a dos outros máximos são perdas.

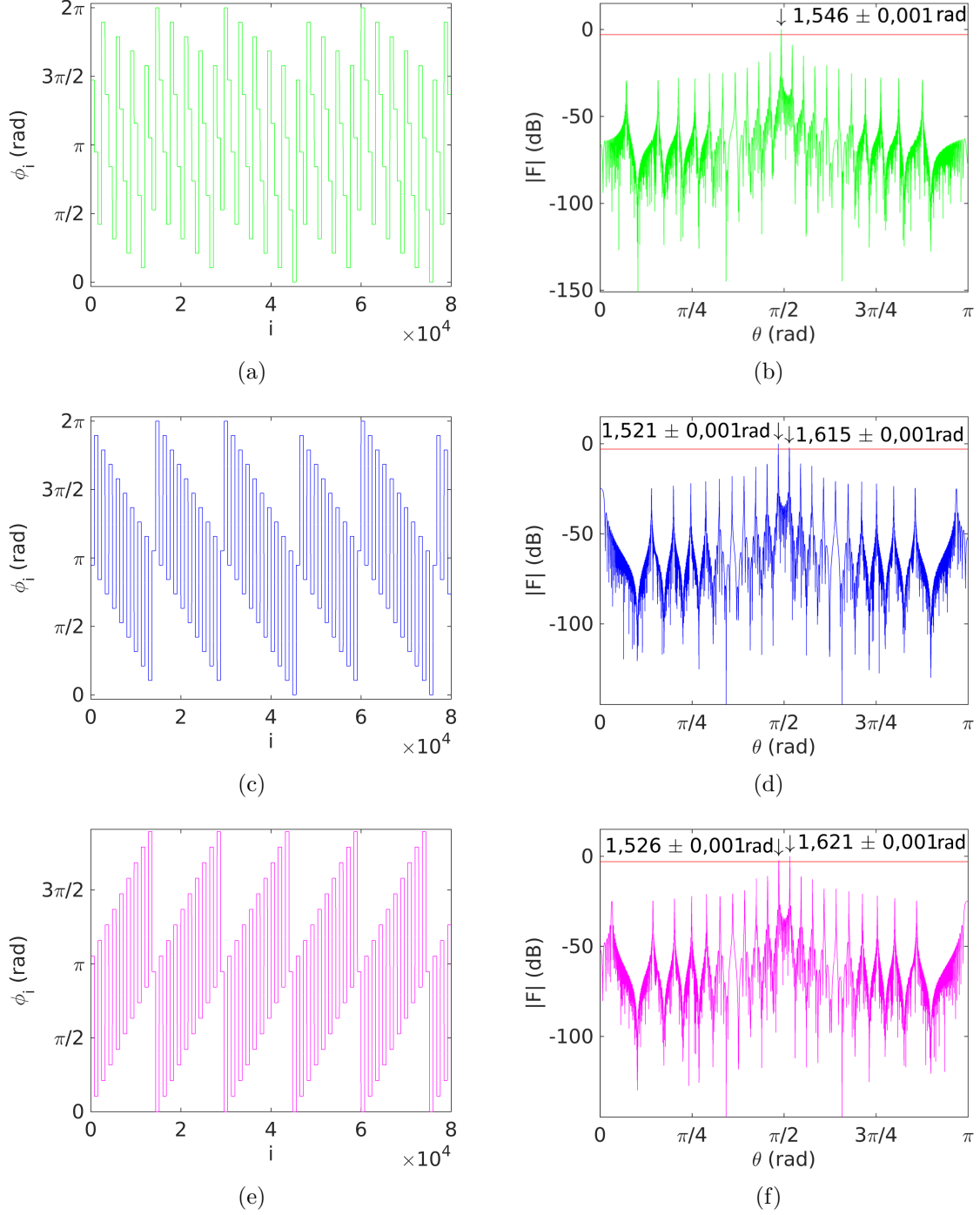


Figura 2.12: (a), (c), (e) Disposição da fase de cada fonte elementar i ao longo de 100 píxeis que deu origem (b), (d), (f), respetivamente.

A situação ideal é a potência estar concentrada no ponto correspondente ao feixe a direcionar e não distribuída por outros pontos secundários, o que é observado nos padrões calculados.

Divisão do feixe

Depois da análise dos resultados anteriores, surgiu a hipótese de tirar partido dos pontos secundários: em vez de se utilizar um feixe para efetuar o varrimento do cenário, divide-se o feixe em vários pontos, que assim fornecem informação do cenário em apenas um pulso (figura 1.7b).

Deste modo, estudou-se a possibilidade de aumentar a potência dos máximos secundários em relação ao ponto mais potente, de forma a gerar um padrão com diversos pontos luminosos com uma distribuição de potência uniforme entre eles.

O padrão pretendido assemelha-se ao padrão de difração de Fraunhofer originado por múltiplas fendas, que é constituído por vários máximos igualmente espaçados com uma amplitude modulada por uma função envolvente [36, 39], tal como representado na figura 2.13. A distância entre dois mínimos da função envolvente depende da largura das fendas e a distância entre os máximos de difração depende do período da rede (distância entre o centro de uma fenda a outra) [36, 39].

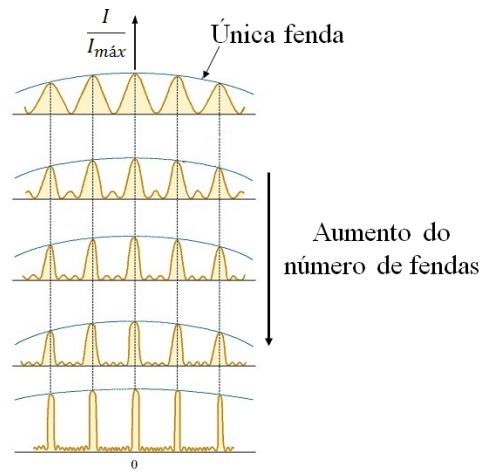


Figura 2.13: Esboço do padrão de difração no regime de difração de Fraunhofer com o aumento do número de fendas consideradas (adaptado de [40]).

Para que a superfície do SLM se assemelhe às múltiplas fendas e, consequentemente, tenha o padrão similar ao referido, tem de ter um perfil de degrau, com a fase alternando entre dois valores. Dependendo dos valores considerados, a intensidade relativa do máximo central altera-se. Por isso, considerou-se os valores de 0 e π para que a intensidade do ponto central fosse minimizada devido à interferência destrutiva e não apresentasse uma intensidade tão elevada como nos casos anteriores. Na figura 2.14b, encontra-se o padrão calculado, considerando esta nova disposição.

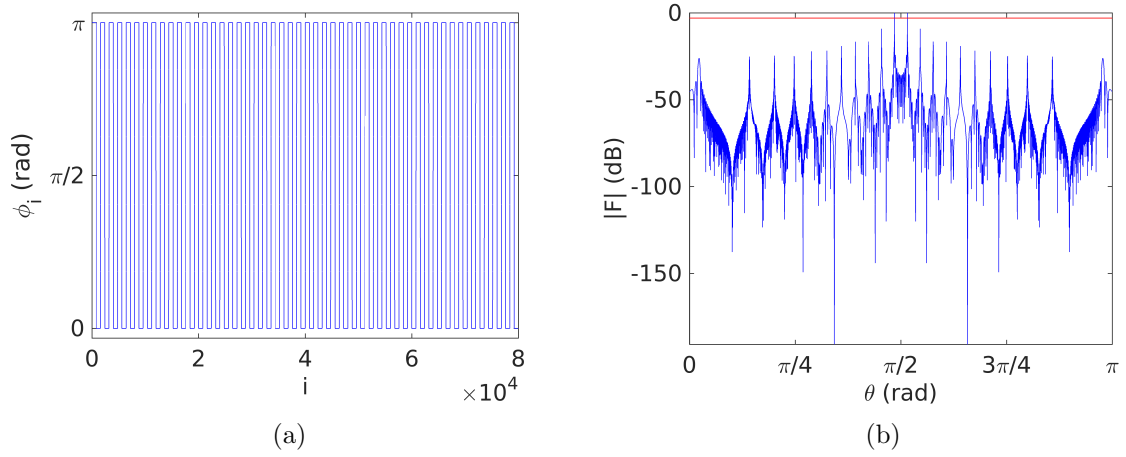


Figura 2.14: (a) Disposição das fases iniciais de cada fonte elementar i , ao longo de 100 píxeis, que deu origem ao (b) padrão.

Apesar de se observar dois máximos na figura 2.14b, ainda existem máximos secundários em que a potência não está distribuída de forma uniforme. Para que isso aconteça é necessário fazer com que a função envolvente seja mais larga, algo que pode ser conseguido através da diminuição da largura do píxel. Portanto, estudou-se a possibilidade de utilizar SLMs com larguras de píxel diferentes das da apresentada pelo SLM PLUTO.

2.3.2 Estudo para diferentes larguras de píxel

Com o objetivo de encontrar a largura de píxel que permitisse obter o padrão pretendido, considerou-se larguras de píxel de $16 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0,5 \mu\text{m}$ e $0,2 \mu\text{m}$, mantendo-se o mesmo número de píxeis ativos (100) e a imposição alternada de fase entre 0 e π . Os padrões gerados são apresentados nas figuras 2.15 e 2.16.

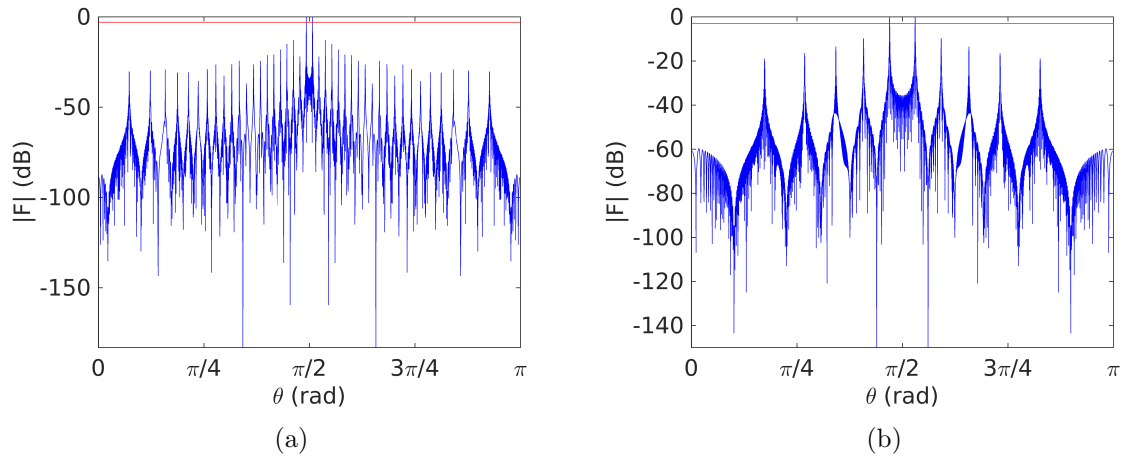


Figura 2.15: Padrão obtido considerando 100 píxeis com largura de (a) $16 \mu\text{m}$ e (b) $4 \mu\text{m}$.

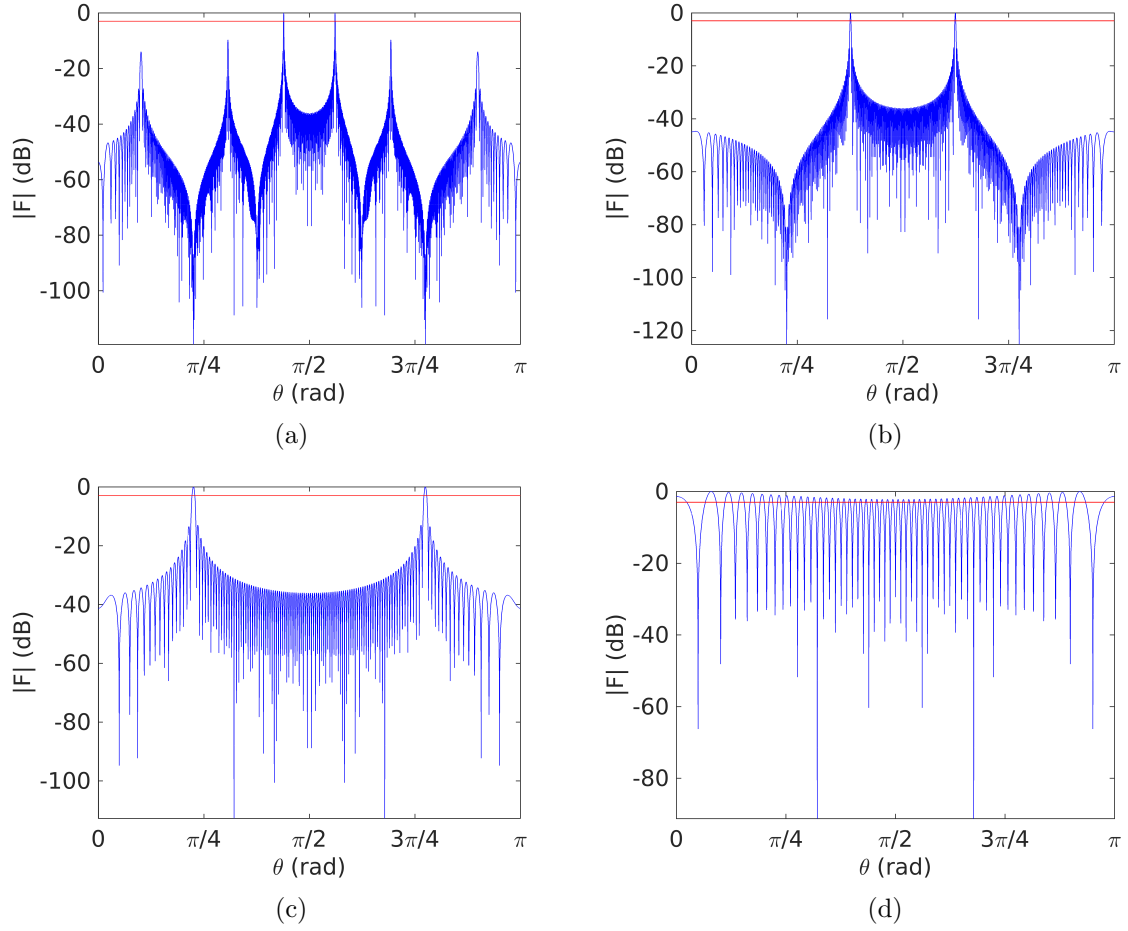


Figura 2.16: Padrão obtido considerando 100 píxeis com largura de (a) $2 \mu\text{m}$, (b) $1 \mu\text{m}$, (c) $0,5 \mu\text{m}$ e (d) $0,2 \mu\text{m}$.

Para todas as larguras de píxel, exceto a de $0,2 \mu\text{m}$, os padrões apresentam apenas dois máximos acima da linha dos -3 dB . À medida que a largura de píxel diminui, os dois máximos referidos vão-se afastando um do outro. Até que no padrão da figura 2.16d, os dois máximos desaparecem, obtendo-se um padrão apenas com os máximos secundários.

De forma a estudar a influência do número de píxeis, ou do número de fontes a interferir, nos padrões gerados, assumiu-se uma largura de píxel de $0,2 \mu\text{m}$, pois o seu padrão é o mais similar ao pretendido. Os padrões calculados, a partir de diferentes números de píxeis ativos (50, 200, 500 e 1000 píxeis), são apresentados na figura 2.17. A partir destes padrões, conclui-se que o aumento do número de píxeis ativos leva ao aumento do número de pontos e à diminuição da largura destes, mas não altera significativamente a forma do próprio padrão.

Para analisar a relação entre o número de pontos e a potência, calculou-se os padrões apenas como I/I_0 (da expressão 2.9), cujos resultados são apresentados nos gráficos da figura 2.18. Para que o número de fontes não influenciasse os resultados, sendo o número de fontes total, N , igual para todos os casos, o número de píxeis ativos foi associado à sua largura. Considerou-se sempre um N de 8×10^4 fontes elementares.

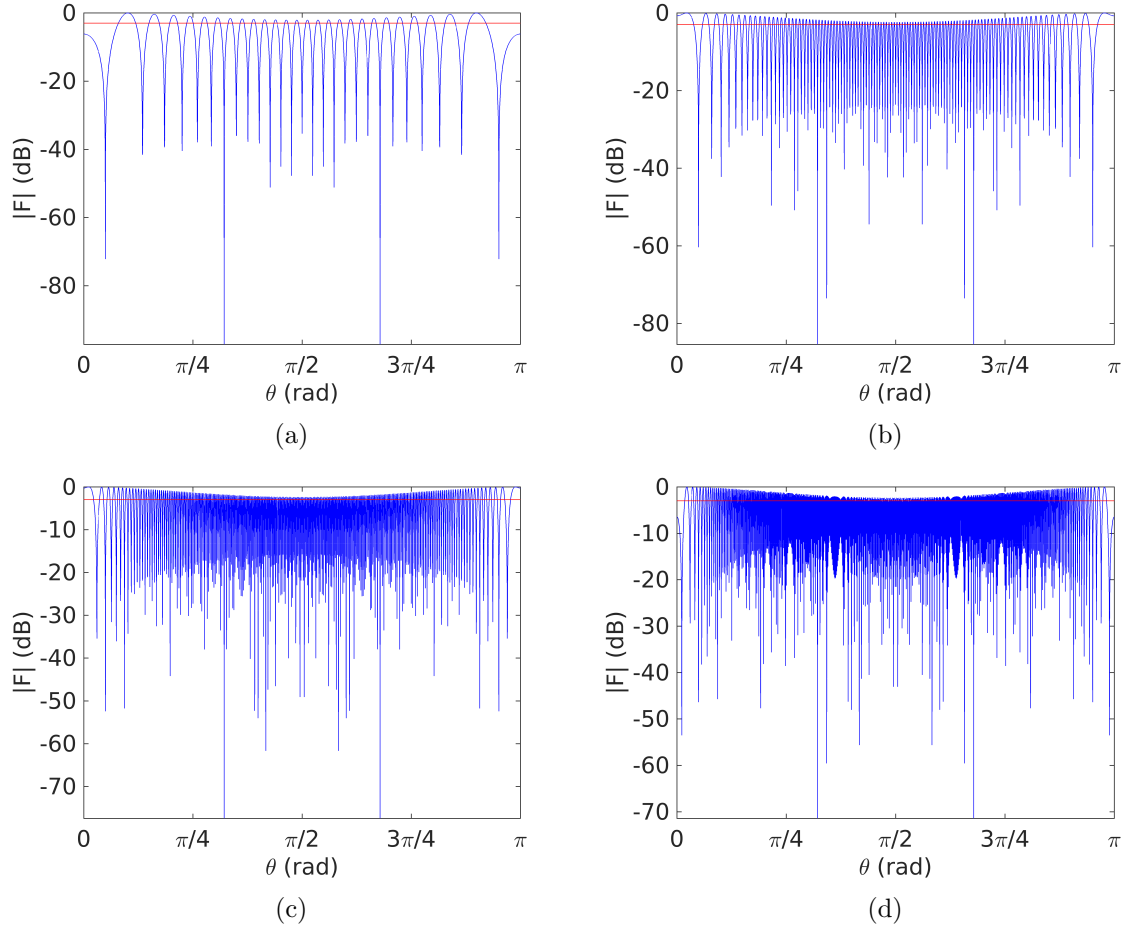


Figura 2.17: Padrão obtido considerando $L = 0,2 \mu\text{m}$ e (a) 50, (b) 200, (c) 500 e (d) 1000 píxeis.

Verifica-se, a partir dos gráficos da figura 2.18, que a potência de pico diminui significativamente desde o padrão da figura 2.18a ao da 2.18d. Apesar disso, observa-se que os máximos do padrão da figura 2.18c apresentam o maior rácio I/I_0 , mas também é aquele que apresenta um menor número de pontos. Para uma mesma potência inicial, quanto mais pontos existirem, menor será a potência de cada um deles. Mas, com a diminuição da largura do píxel para valores em torno dos $0,2 \mu\text{m}$, também se observa o afastamento dos dois máximos, alargando a zona dos máximos secundários apesar do número total de fontes ser o mesmo, o que se pode dever a uma maior influência da interferência destrutiva para larguras desta ordem. Por isso, não só o número de pontos, como também a largura do píxel, são características a ter em conta para o padrão final. É necessário um equilíbrio entre o número de pontos, a sua potência e a distância entre eles para que nenhum obstáculo passe despercebido, mas não foi possível otimizar de forma independente estes parâmetros.

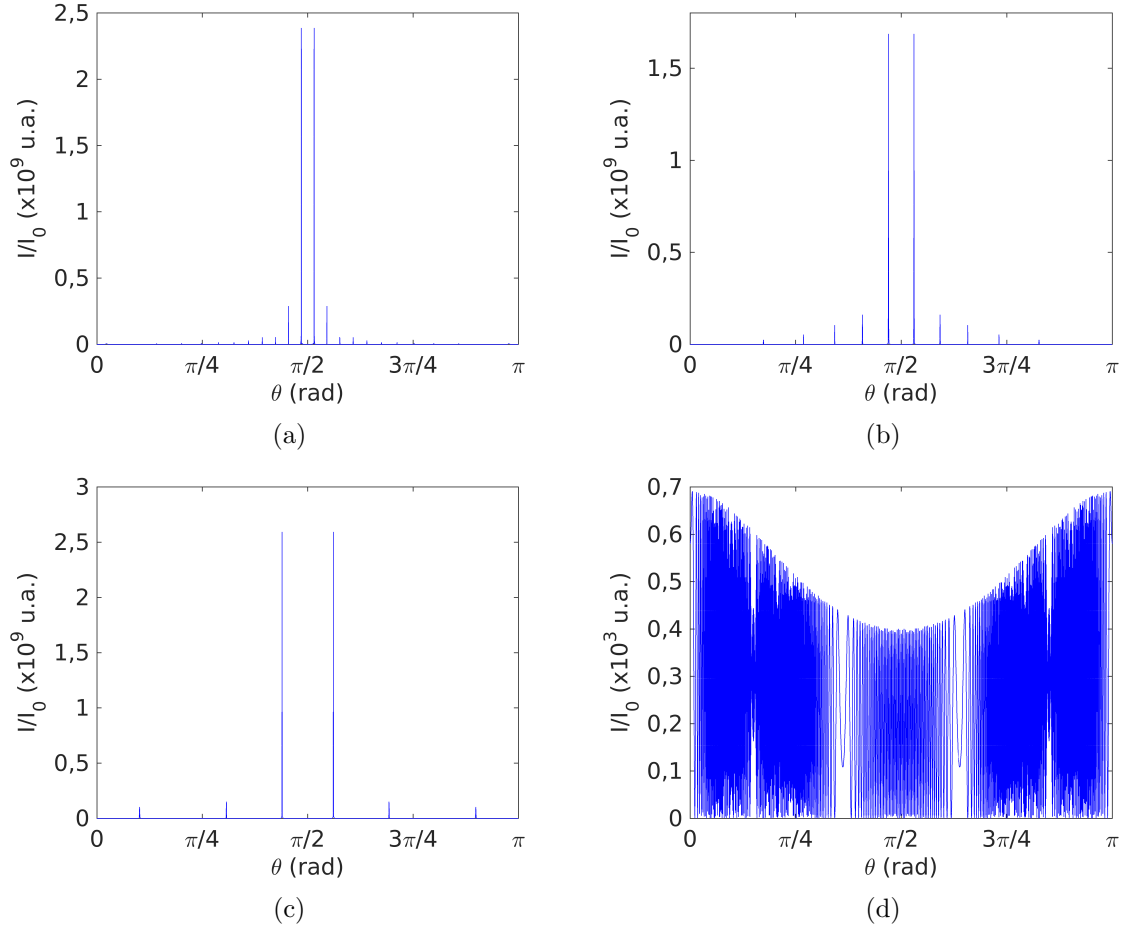


Figura 2.18: Padrão de I/I_0 obtido considerando (a) $L = 8 \mu\text{m}$ e 100 píxeis, (b) $L = 4 \mu\text{m}$ e 200 píxeis, (c) $L = 2 \mu\text{m}$ e 400 píxeis, e (d) $L = 0,2 \mu\text{m}$ e 4000 píxeis.

2.4 Sumário

Neste capítulo verificou-se que era possível mudar a direção do feixe de luz, mas só se conseguiu movê-lo até os $\pm 2,85^\circ$. Em termos de divisão do feixe, só foi possível obter a potência bem distribuída entre os pontos para larguras de píxel em torno dos $0,2 \mu\text{m}$, que é menor às larguras de píxel dos SLMs comercialmente disponíveis. Por exemplo, o SLM com menor largura de píxel da Holoeye, é o SLM GAFA-2 com $L = 3,74 \mu\text{m}$ [41], que é bastante superior aos $0,2 \mu\text{m}$. Para além disso, a relação entre o número de pontos luminosos e a sua potência não foi otimizada. Por estas razões, conclui-se que a integração de um SLM num sistema LIDAR não é uma hipótese viável, não se progredindo o seu estudo.

De referir que este estudo foi teórico, experimentalmente seria ainda mais difícil controlar o desvio de fase imposto, apresentando alterações ao previsto. Por exemplo, o SLM sendo um refletor terá de apresentar uma certa inclinação, que não foi tida em consideração no modelo. Além disso, a mudança de fase de píxel para píxel não é tão brusca quanto a assumida na disposição das fases iniciais, pois as moléculas apresentam uma inclinação gradual ao longo dos píxeis, de acordo com o campo elétrico a que estão sujeitas.

Capítulo 3

Elementos óticos difrativos: estudo experimental

Neste capítulo, é apresentado o trabalho experimental realizado para a validação da viabilidade da integração de elementos óticos difrativos na divisão do feixe luminoso em vários feixes. A escolha dos DOEs deve-se ao facto de serem estruturas de pequenas dimensões, que podem ser feitas a partir de materiais de baixo custo e desenhadas de acordo com o padrão pretendido. Após uma introdução a estes elementos, é descrito o procedimento experimental realizado para caracterizar os padrões gerados com os diferentes DOEs testados, acompanhado com a análise dos resultados.

3.1 Elementos óticos difrativos

Os DOEs são exemplos práticos da aplicabilidade da difração da luz, sendo a sua microestrutura determinada consoante o fim que se pretende, tal como modular um feixe, criar difusores ou hologramas de Fourier [42]. Para além disso, os DOEs podem ser desenvolvidos de forma a terem praticamente as mesmas funções óticas de componentes refrativos, tais como lentes, com a vantagem de serem mais leves e pequenos [42].

Os DOEs testados no âmbito deste trabalho, apresentados na figura 3.1a, são da Holoeye. As microestruturas dos diferentes DOEs, que podem ser gravadas em sílica fundida (ou outros tipos de vidro) ou em diversos materiais poliméricos, permitem a obtenção de diferentes padrões [42].

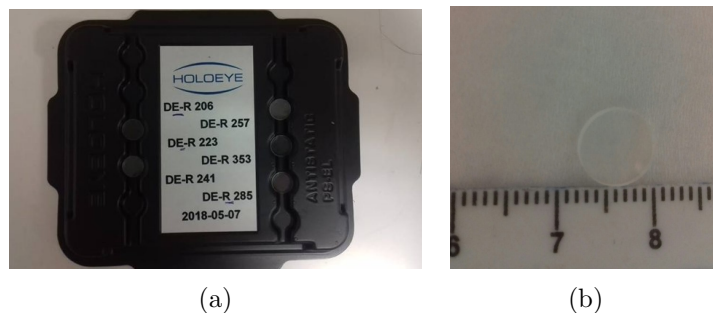


Figura 3.1: Fotografias (a) dos diferentes DOEs utilizados e (b) da comparação entre um DOE e uma régua cuja menor divisão da escala é 1 mm.

Foram testados seis DOEs neste trabalho para analisar e comparar os diferentes padrões gerados e, deste modo, distinguir características relevantes, nomeadamente a possibilidade de o feixe luminoso central ser inibido, o número de pontos, a alteração da distância entre eles e do tamanho do padrão com a distância. Todos os DOEs testados são de material polimérico e, como se pode verificar na figura 3.1b, de dimensões pequenas, minimizando o espaço necessário para a montagem experimental.

3.2 Caracterização de padrões obtidos com DOEs

Como dito anteriormente, o padrão final pretendido é constituído por diversos pontos luminosos, com uma potência distribuída de forma uniforme entre eles (figura 1.7b). Para gerar este padrão, usou-se a montagem experimental apresentada na figura 3.2. Nesta montagem, a fonte de luz está ligada à fonte de corrente. A luz emitida é colimada pela lente e, após atravessar o DOE, o feixe é dividido em vários pontos. Com o objetivo de estudar o comportamento dos diferentes componentes da montagem experimental, começou-se pela sua caracterização. Depois, estudou-se o padrão obtido pelo DOE DE-R 223 e analisou-se a divisão do feixe: se o DOE divide o feixe em vários feixes, a forma e potência dos pontos e quais as perdas associadas. Para os restantes DOEs, os padrões gerados foram estudados qualitativamente e as suas características comparadas.

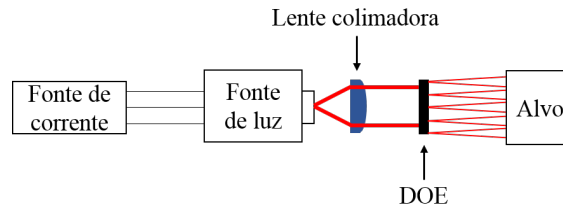


Figura 3.2: Esquema da montagem experimental utilizada para caracterizar os DOEs.

3.2.1 Caracterização dos Componentes

Nesta subsecção, é apresentada a caracterização dos diferentes elementos utilizados na montagem experimental, que permitem a obtenção de um feixe luminoso colimado.

Caracterização da fonte de luz

Como fonte de luz, utilizou-se um díodo *laser* HL6738MG da Thorlabs, cujo encapsulamento inclui um fotodíodo, que quando inversamente polarizado pode monitorizar a potência de saída do díodo *laser* [43]. A gama de comprimentos de onda do *laser* situa-se no visível (entre os 680 aos 695 nm) [43], para facilitar a visualização dos padrões e alinhamento dos diversos componentes.

Para que não houvesse sobrecarga do díodo *laser*, pondo em causa a sua integridade, foi necessário um controlo preciso da intensidade de corrente de operação. Por isso, foi utilizada a fonte de corrente modelo 5000 da Newport, indicada para díodos *laser*. Esta fonte de corrente também permitiu colocar o fotodíodo inversamente polarizado com 5 V, para introduzir uma barreira de potencial no fotodíodo, que só a quebra quando a potência luminosa emitida pelo díodo *laser* é elevada o suficiente.

O primeiro teste realizado teve como objetivo obter a curva característica do díodo *laser* para se associar a potência da luz emitida com a intensidade da corrente que atravessa o díodo, variável que é controlada com a fonte de corrente. Para isso recorreu-se à montagem experimental da figura 3.3b, cujo esquema é apresentado na figura 3.3a. Registou-se a intensidade da corrente que passa no díodo *laser*, I_{LD} , a partir da qual a potência da luz emitida por este, potência de saída, aumenta consideravelmente e, conseqüentemente, o fotodíodo também começa a conduzir.

Variou-se a I_{LD} através da fonte de corrente e registou-se a intensidade de corrente que atravessa o fotodíodo, I_{PD} , e a potência de saída. A primeira foi medida pela própria fonte de corrente e a última utilizando o medidor de potência PM100D com o sensor S120C.

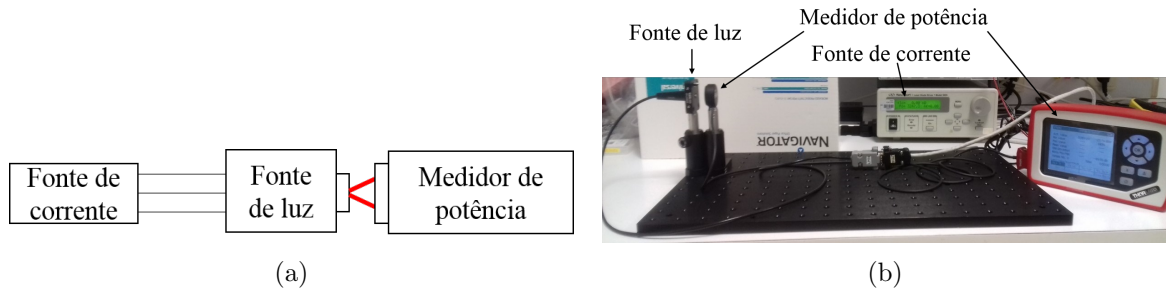


Figura 3.3: (a) Esquema e (b) montagem experimental correspondente para obtenção de potência de saída e I_{PD} em função de I_{LD} .

Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.4.

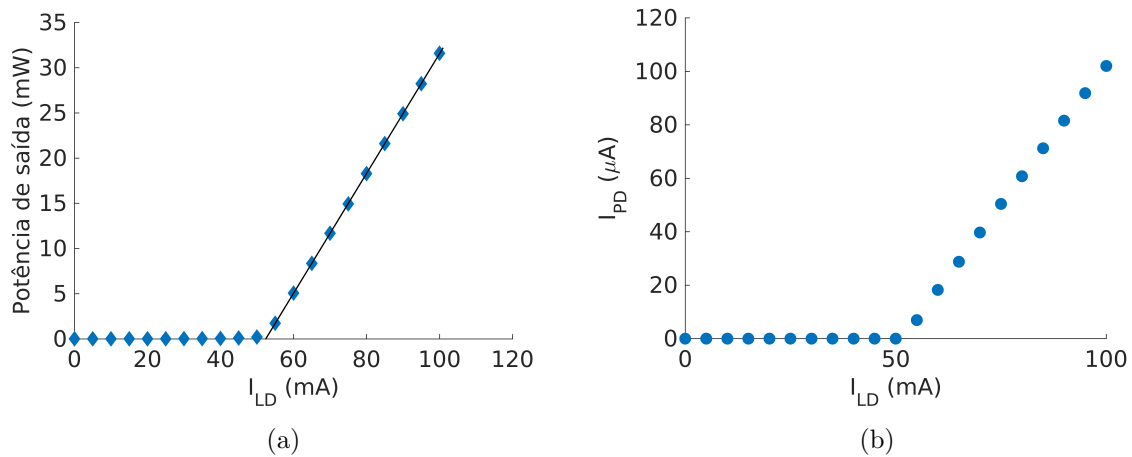


Figura 3.4: Gráfico da (a) potência de saída e (b) I_{PD} em função de I_{LD} .

Observa-se, no gráfico da figura 3.4b, que I_{PD} é proporcional a I_{LD} . Assim que o díodo *laser* começa a emitir luz com potência suficiente, o fotodíodo começa a conduzir. Acima do limiar, I_{PD} é proporcional à potência de saída do *laser*, que por sua vez é proporcional a I_{LD} . Utilizando uma regressão linear dos valores a partir dos quais a potência de saída aumenta rapidamente, do gráfico da figura 3.4a, obtém-se uma intensidade de corrente limiar de $52,40 \pm 0,12$ mA.

De seguida, estudou-se a forma do feixe emitido e o seu comportamento com a distância. Para isso, trocou-se o medidor de potência pelo perfilômetro de feixe #89-308 da Edmund Optics, com o qual é possível observar a distribuição de potência no ponto luminoso. A montagem experimental é apresentada nas figuras 3.6a e 3.6b, com respetivo esquema na figura 3.5. Inicialmente, foi estabelecida uma corrente I_{LD} de $55,00 \pm 0,01$ mA.

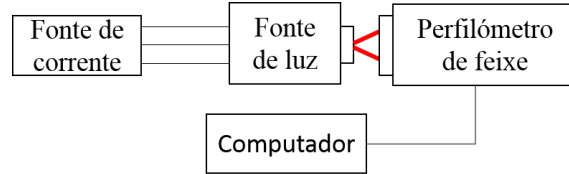
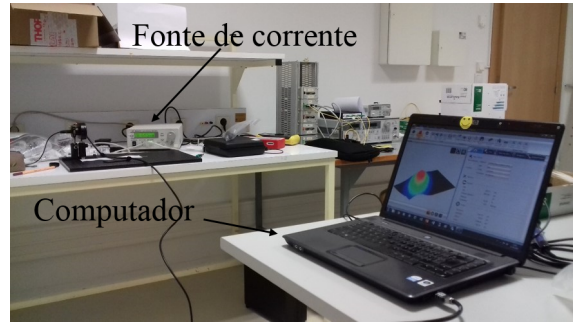


Figura 3.5: Esquema da montagem experimental da figura 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.6: (a) e (b) Montagem experimental realizada para a obtenção da forma do feixe *laser*.

Na figura 3.7, são apresentadas duas imagens capturadas com o perfilômetro com uma diferença de distância entre si de $2,0 \pm 0,5$ mm. As perturbações existentes nestas imagens (mais notórias no canto inferior esquerdo) devem-se, por exemplo, à presença de pó e partículas na superfície do perfilômetro de feixe. Confirma-se que o feixe tem forma oval. A zona ativa de um díodo *laser* é um retângulo, fazendo com que uma largura menor leve a uma maior divergência segundo essa direção [44]. Assim, a divergência apresentada pelo feixe é diferente consoante a direção e, conseqüentemente, apresenta uma forma elíptica. A partir do esquema da figura 3.8a, assume-se que o eixo yy é paralelo à junção, associando-se ao menor diâmetro da elipse, e o eixo xx é perpendicular à junção, apresentando o maior diâmetro da elipse.

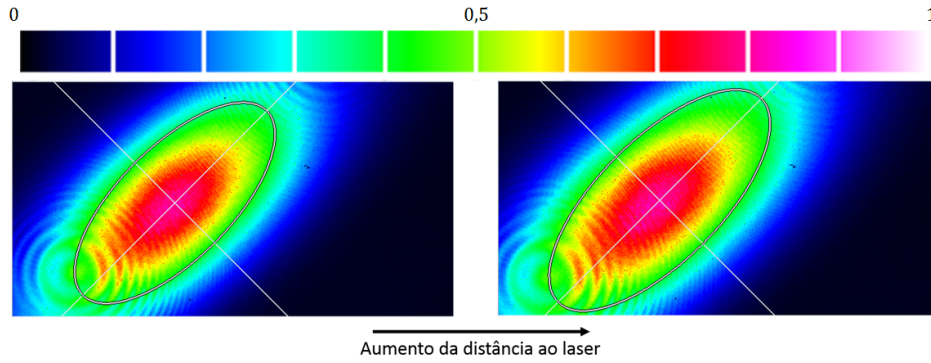


Figura 3.7: Imagens obtidas através do perfilómetro, distanciadas de $2,0 \pm 0,5$ mm entre si.

Por regra, os diâmetros são definidos a partir da largura entre os $1/e^2$ do máximo de intensidade [44], mas, como se observa na figura 3.7, a área do feixe não é capturada completamente pelo perfilómetro. Assim, a elipse calculada pelo *software* pode não ser a real. Devido a isto, os diâmetros foram definidos como a largura à meia altura segundo cada direção. Ou seja, a distância ao longo de cada eixo desde a posição em que está o primeiro valor de metade do máximo até à posição em que está o último valor igual à metade do máximo de energia. Obtendo-se os diâmetros a duas distâncias diferentes, foi calculada a divergência do feixe, Θ , em cada um dos eixos. A partir do esquema da figura 3.8b, obtém-se a expressão:

$$\Theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D_g - D_p}{2l} \right), \quad (3.1)$$

em que l é a distância entre as duas localizações diferentes, D_p e D_g são o diâmetro do feixe na localização mais próxima e mais longínqua do *laser*, respetivamente.

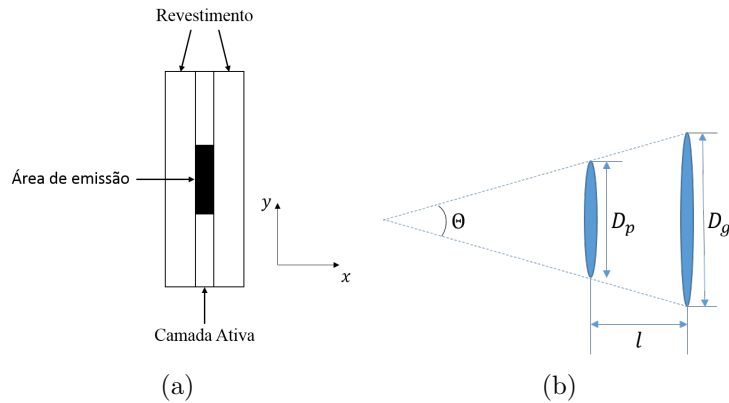


Figura 3.8: Esquema (a) da área ativa de um díodo laser e (b) da divergência.

Para o cálculo de Θ , não é necessária a distância ao *laser*, mas sim a distância entre as duas localizações consideradas. Neste caso, essa distância é $2,0 \pm 0,5$ mm, pois era a máxima possível para que a zona a estudar do feixe não ultrapassasse a área ativa do perfilómetro.

Foram realizados dois ensaios (cada um para dois I_{LD} diferentes), sendo que em cada um deles foram registados os diâmetros durante 2 minutos a uma velocidade de aproximadamente uma imagem por segundo. Para cada um, calculou-se a média desses valores, que corresponde

aos diâmetros apresentados nas tabelas 3.2 (para $I_{LD} = 97,00 \pm 0,01$ mA) e 3.1 (para $I_{LD} = 55,00 \pm 0,01$ mA). O erro associado aos diâmetros D_p e D_g é dado pelo desvio padrão da média. O erro associado ao cálculo de Θ é obtido através das derivadas parciais da expressão 3.1.

	$D_p(\text{mm})$	$D_g(\text{mm})$	$\Theta(^{\circ})$
<i>eixo xx</i>	$6,702 \pm 0,001$	$7,371 \pm 0,004$	$19,0 \pm 4,8$
<i>eixo yy</i>	$2,904 \pm 0,002$	$3,160 \pm 0,002$	$7,3 \pm 1,9$

Tabela 3.1: Divergência quando $I_{LD} = 55,00 \pm 0,01$ mA e $l = 2,0 \pm 0,5$ mm.

	$D_p(\text{mm})$	$D_g(\text{mm})$	$\Theta(^{\circ})$
<i>eixo xx</i>	$6,574 \pm 0,017$	$7,321 \pm 0,008$	$21,2 \pm 5,9$
<i>eixo yy</i>	$2,988 \pm 0,002$	$3,282 \pm 0,003$	$8,4 \pm 2,2$

Tabela 3.2: Divergência quando $I_{LD} = 97,00 \pm 0,01$ mA e $l = 2,0 \pm 0,5$ mm.

O feixe *laser* apresenta uma elevada divergência, principalmente segundo o *eixo xx*. A partir da lista de especificações do *laser*, a divergência está em torno dos 19° no eixo perpendicular e $8,5^{\circ}$ no paralelo à junção, por isso os resultados obtidos estão de acordo com o esperado. Os erros associados podem dever-se ao facto de o feixe não ser totalmente capturado, da existência de perturbações (associadas ao pó e partículas) e ao não controlo de temperatura do *laser*.

Devido à grande divergência apresentada pelo feixe, o ponto luminoso a alguns metros de distância tem a potência distribuída por uma grande área. O que se pretende é que, após a colocação do DOE, se obtenha um padrão de múltiplos pequenos pontos, por isso é necessário o feixe apresentar baixa divergência. Portanto, decidiu-se colimá-lo para que as suas características fossem praticamente as mesmas a diferentes distâncias.

Caracterização do feixe colimado

A lente colimadora utilizada foi a lente esférica com o código 354057B da LightPath. A lente foi colocada como ilustrado na figura 3.9, e a sua distância foi ajustada até se obter um feixe colimado.

Analisou-se o feixe com o perfilómetro para várias distâncias entre este e a lente, através da montagem esquematizada na figura 3.10. As imagens capturadas são apresentadas na figura 3.11.

Foi calculada a divergência tal como anteriormente, utilizando a localização mais próxima e mais longínqua do *laser*, distanciadas de $344,0 \pm 0,1$ cm. Os valores calculados são apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4.

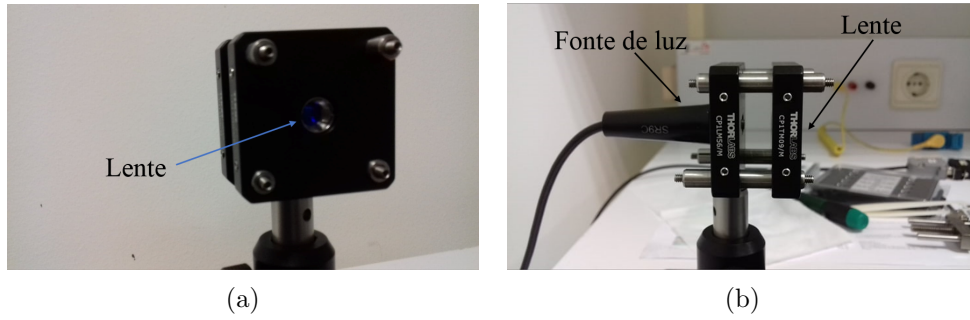


Figura 3.9: Vista de (a) frente e (b) perfil do sistema de laser com lente na distância que permite a colimação do feixe.

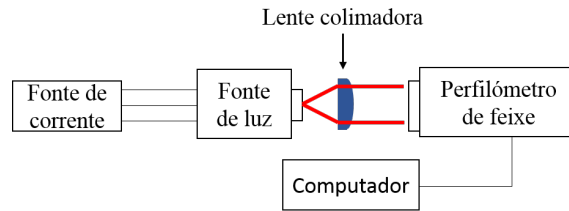


Figura 3.10: Representação da divergência.

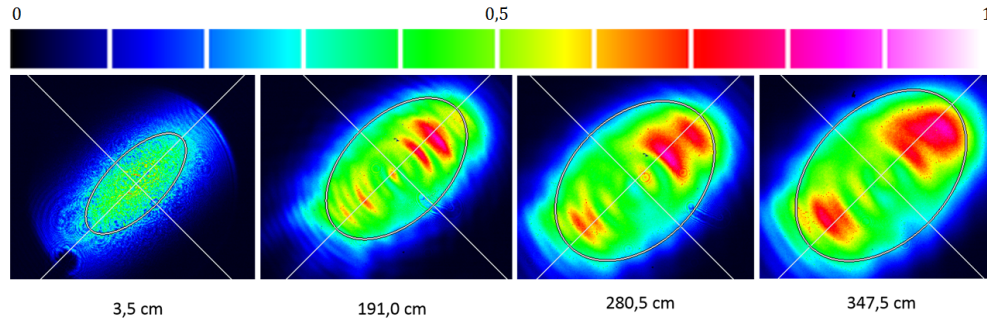


Figura 3.11: Imagens obtidas através do perfilômetro de feixe a diversas distâncias do laser.

	$D_p(mm)$	$D_g(mm)$	$\Theta(^{\circ})$
<i>eixo xx</i>	$3,229 \pm 0,028$	$5,471 \pm 0,001$	$0,037 \pm 0,019$
<i>eixo yy</i>	$1,818 \pm 0,012$	$3,676 \pm 0,002$	$0,031 \pm 0,016$

Tabela 3.3: Divergência, quando $I_{LD} = 55,00 \pm 0,01$ mA e $l = 344,0 \pm 0,1$ cm, para o feixe colimado.

	$D_p(mm)$	$D_g(mm)$	$\Theta(^{\circ})$
<i>eixo xx</i>	$3,487 \pm 0,010$	$5,453 \pm 0,002$	$0,033 \pm 0,017$
<i>eixo yy</i>	$1,712 \pm 0,006$	$3,869 \pm 0,002$	$0,036 \pm 0,018$

Tabela 3.4: Divergência, quando $I_{LD} = 97,00 \pm 0,01$ mA e $l = 344,0 \pm 0,1$ cm, para o feixe colimado.

Verifica-se que a divergência do feixe colimado é menor do que a divergência sem lente, tornando-se possível obter o padrão pretendido após a colocação do DOE. Apesar disso, verifica-se que a potência central vai deixando de ser um máximo em comparação com as zonas exteriores, o que indica uma perda do comportamento gaussiano segundo o *eixo xx*.

Utilizando o medidor de potência, mediu-se a potência total depois da lente para várias I_{LD} . Estes resultados foram sobrepostos aos obtidos anteriormente (figura 3.4), apresentando-se a sua comparação nos gráficos da figura 3.12.

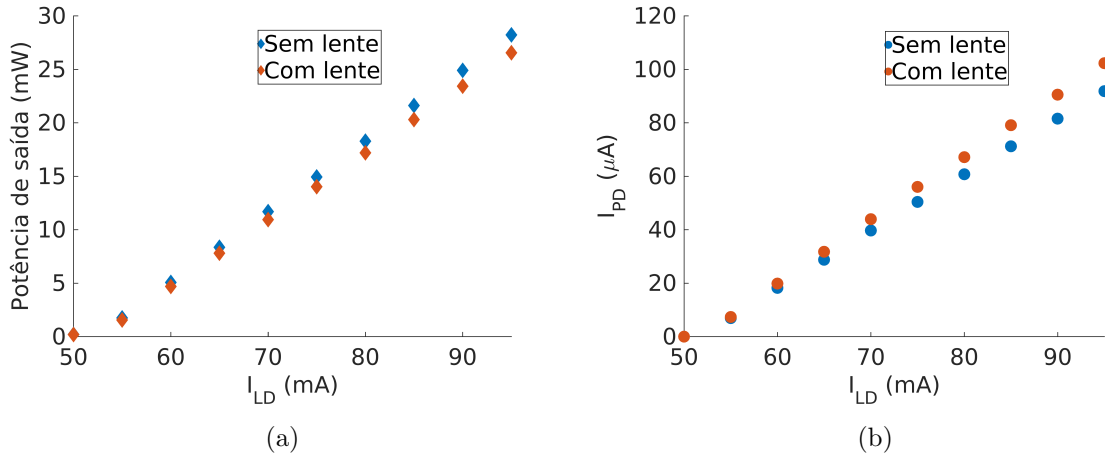


Figura 3.12: Gráfico da (a) potência à saída da lente e (b) I_{PD} em função de I_{LD} para o feixe colimado.

No gráfico da figura 3.12a, verifica-se que a potência de saída é inferior após lente. Esta deve-se ao facto de o feixe ser maior que a lente e à reflexão, não passando na sua totalidade por ela. A partir da figura 3.11, observa-se que, segundo o maior diâmetro, o feixe está a ser delimitado pela lente. Na figura 3.12b, é apresentada a I_{PD} no caso com a lente em comparação com o sem lente. Verifica-se que, no caso com lente, I_{PD} é superior, enquanto que a potência de saída é inferior. Deste modo, confirma-se que parte da luz está a ser refletida pela lente e pelo seu suporte. Foi realizada uma regressão linear com os valores do gráfico 3.12a (exceto, o referente a $I_{LD} = 50,00 \pm 0,01$ mA, pois está abaixo do limiar). Com lente, o declive da reta é $0,6247 \pm 0,0004$ mW/mA. Sem lente, é $0,6619 \pm 0,0011$ mW/mA. Assim, tem-se uma perda estimada da taxa de aumento da potência de saída com o aumento de I_{LD} de $0,6619/0,6247 \approx 1,09$ (uma perda que corresponde a 5,6% do valor sem lente).

As características apresentadas pelo feixe *laser* colimado viabilizam a colocação do DOE de forma a se obter os padrões pretendidos.

3.2.2 Caracterização

Como já referido, diferentes DOEs apresentam diferentes padrões. A caracterização do DOE DE-R 223 foi feita com maior pormenor, com o objetivo de melhorar a compreensão acerca do funcionamento destes. Para os restantes DOEs, foi feita uma análise e comparação principalmente qualitativa a nível dos padrões obtidos.

Padrão com 5 pontos

Segundo a lista de especificações, o DOE-R 223 gera um padrão com cinco pontos luminosos, um máximo central e quatro pontos exteriores [45], tal como representado na figura 3.13.

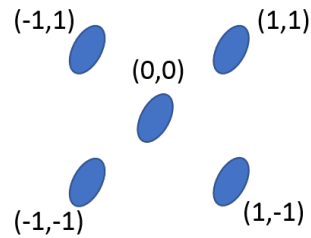


Figura 3.13: Esboço do padrão esperado utilizando o DOE DE-R 223 e nomeação das coordenadas assumidas para identificação de cada ponto.

Na figura 3.14, são apresentadas fotografias da montagem experimental.

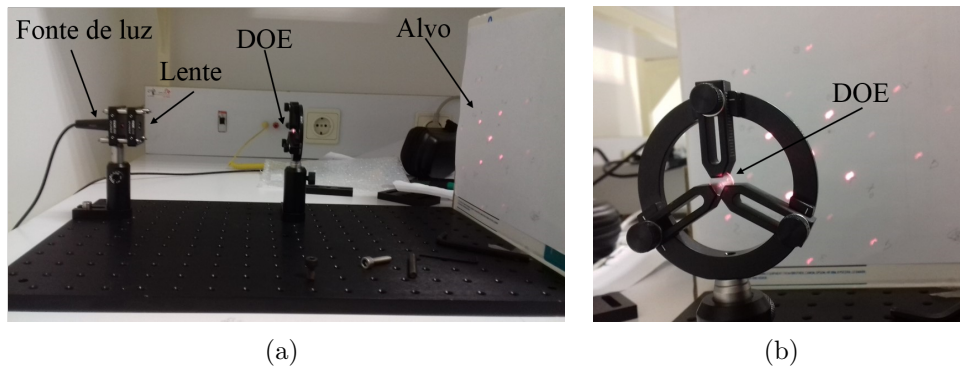


Figura 3.14: (a) Montagem experimental para gerar um padrão e (b) suporte com o DOE.

Estudou-se os padrões gerados para três distâncias entre o DOE e o alvo, que são apresentados nas figuras 3.15 e 3.16. De seguida, analisou-se cada ponto utilizando o perfilómetro. As imagens capturadas encontram-se ao lado do padrão correspondente. Nestes testes, a intensidade de corrente que passa pelo díodo *laser* é $97,00 \pm 0,01$ mA, para que os padrões fossem captados pela câmara utilizada.

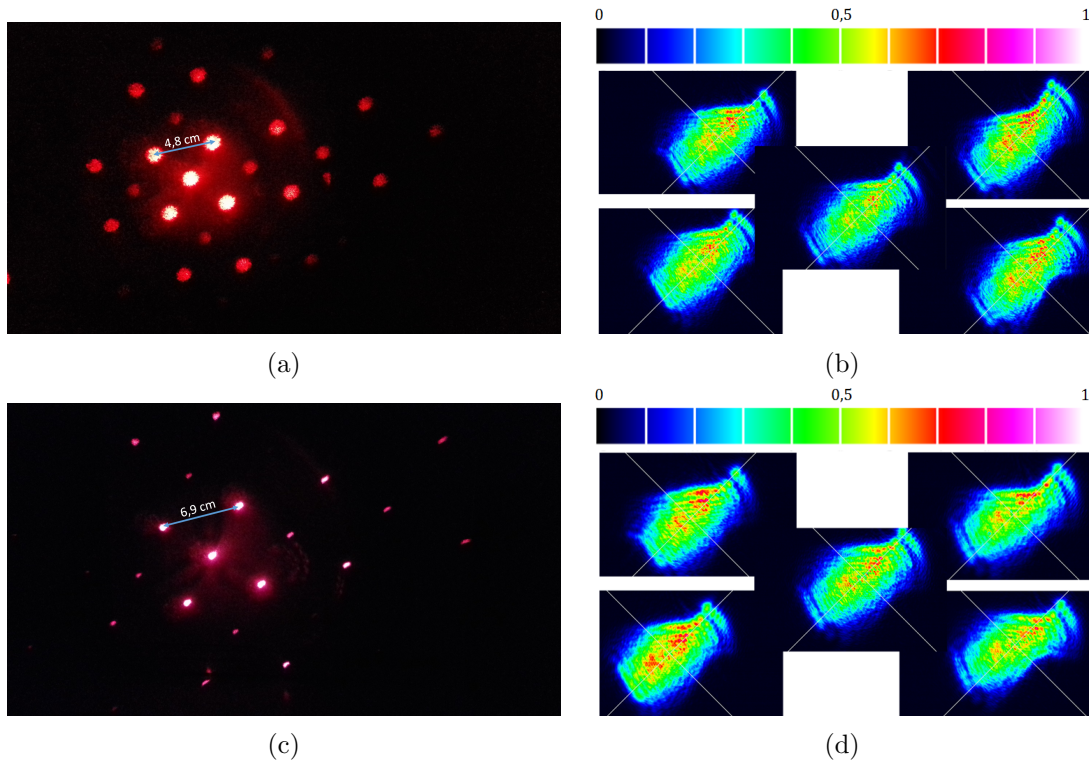


Figura 3.15: À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o alvo a uma distância de (a), (b) $21,50 \pm 0,05$ cm e (c), (d) $31,50 \pm 0,05$ cm do DOE DE-R 223.

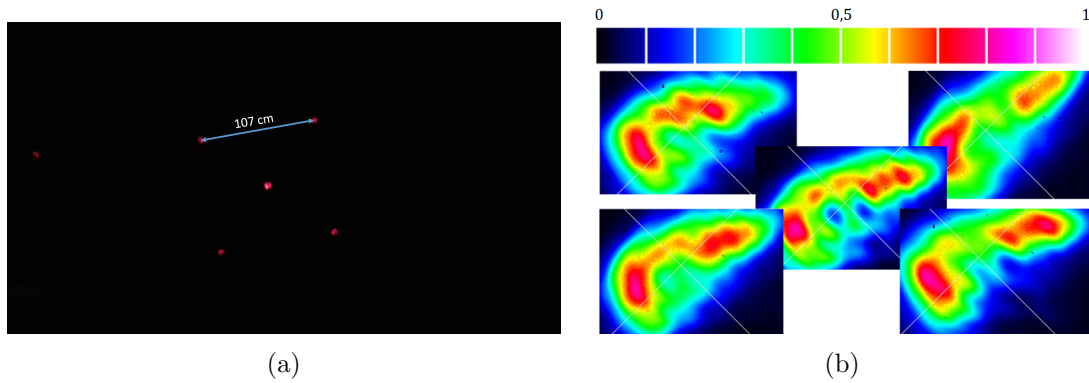


Figura 3.16: À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o alvo a uma distância de aproximadamente 5,5 m do DOE DE-R 223.

Para além dos cinco pontos principais, existem também pontos secundários. Comparando os diferentes pontos principais para diversas distâncias, apresentados nas figuras 3.15 e 3.16, confirma-se que o DOE divide o feixe em 5 pontos com a forma aproximadamente igual e com a disposição esperada. Para além disso, verificou-se novamente a perda do formato gaussiano da distribuição de potência do feixe com a distância. De notar que a forma dos pontos está modificada devido às garras do suporte do DOE. Durante a realização deste teste, também

se observou pontos na parede atrás da montagem experimental, que resultaram da reflexão parcial do feixe no DOE.

Usando o medidor de potência, mediu-se a potência dos cinco pontos principais para as três distâncias consideradas. Estes resultados são apresentados na tabela 3.5.

d_a		(-1,1)	(1,1)	(-1,-1)	(1,-1)	(0,0)	Total
$21,50 \pm 0,05$ cm	Potência (mW)	2,837	2,845	2,864	2,896	5,430	16,872
	Potência normalizada (u.a.)	0,168	0,169	0,170	0,172	0,322	1,000
$31,50 \pm 0,05$ cm	Potência (mW)	2,814	2,825	2,845	2,885	5,403	16,772
	Potência normalizada (u.a.)	0,168	0,168	0,170	0,172	0,322	1,000
$\approx 5,5$ m	Potência (mW)	2,556	2,370	2,669	2,524	4,853	14,972
	Potência normalizada (u.a.)	0,171	0,158	0,172	0,169	0,324	1,000

Tabela 3.5: Potência e respetiva normalização para cada ponto com o alvo em diferentes distâncias, d_a .

A potência total do feixe depois da lente era 27,79 mW, enquanto que a soma do valor de potência nos cinco pontos é 16,872 mW, tal como consta da tabela 3.5. Somando este valor à potência dos 8 pontos secundários com potência mais elevada, presentes na figura 3.17, tem-se um total de $16,872 + 1,968 = 18,840$ mW (a potência destes pontos é apresentada na tabela 3.6). Confirma-se que existem perdas de potência no DOE.

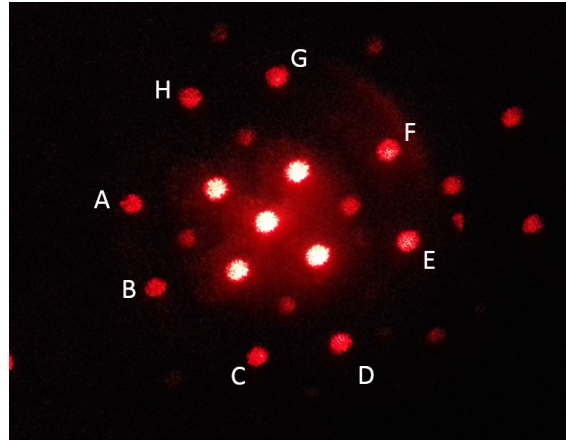


Figura 3.17: Nomeação de pontos de ordens secundárias.

	A	B	C	D	E	F	G	H	Total
Potência (mW)	0,242	0,232	0,264	0,261	0,253	0,257	0,226	0,233	1,968

Tabela 3.6: Potência dos pontos secundários da figura 3.17, a $d_a = 21,50 \pm 0,05$ cm.

A potência imediatamente depois do DOE era 19,94 mW, deste modo a perda de potência é de $(27,05 - 19,94)/27,05 \approx 26\%$. Esta perda é explicada pelo facto de parte do feixe

ser obstruído pelas garras do suporte e pela reflexão do feixe no DOE, originando os pontos luminosos secundários na parede atrás da montagem.

O máximo central apresenta praticamente o dobro de potência dos restantes pontos, uma característica não desejável tendo em conta o objetivo final. Segundo a lista de especificações do DOE utilizado, para comprimentos de onda entre os 450 e 520 nm, espera-se que o máximo central se anule praticamente [45]. A sua intensidade aumenta consideravelmente com o aumento do comprimento de onda utilizado [45]. Apesar disso, os restantes quatro pontos principais têm uma potência bem distribuída entre si.

Influência do ângulo de incidência no DOE

Experimentalmente, não foram utilizados métodos precisos para alinhar os componentes da montagem experimental. Como a potência do ponto central era aproximadamente o dobro dos restantes pontos principais, estudou-se qualitativamente a influência do ângulo de incidência no padrão. Para isso, rodou-se o DOE no sentido horário e anti-horário até que o suporte obstruísse a passagem do feixe. As imagens captadas são apresentadas na figura 3.18.

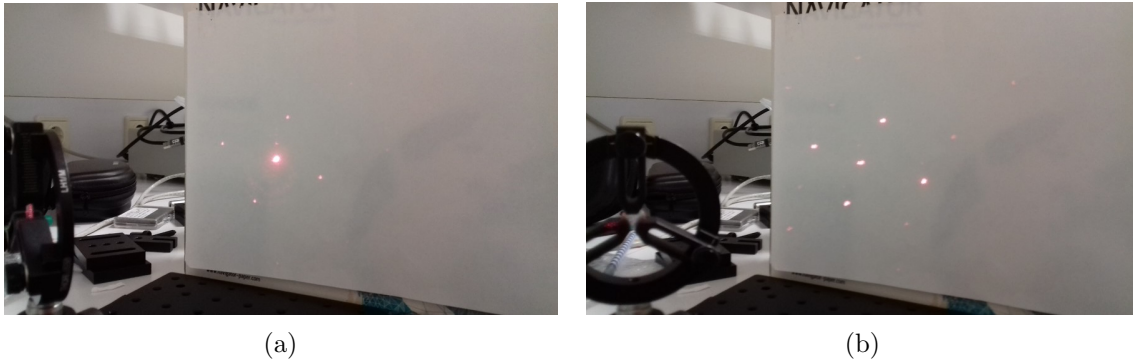


Figura 3.18: Padrão obtido com o suporte na posição mais extrema do sentido (a) horário e (b) anti-horário.

O padrão apresenta-se distorcido em relação ao gerado anteriormente e a potência relativa do máximo central aparenta ser bastante superior aos restantes pontos na figura 3.18a. Conclui-se que o ângulo de incidência influencia o padrão obtido, o que se pode dever ao facto de ângulos de incidência grandes levarem a que o feixe veja uma microestrutura aparentemente diferente fazendo com que o padrão final não seja igual ao esperado.

Influência da posição do feixe luminoso

Para se estudar a influência da alteração do ângulo de incidência e posição do feixe luminoso no DOE, manteve-se o DOE na mesma posição e rodou-se o *laser* no sentido horário e anti-horário até que o feixe saísse da área do DOE. Na figura 3.19, estão presentes duas imagens captadas com o feixe inclinado mais à esquerda (resultante do movimento anti-horário do *laser*) e mais à direita (resultante do movimento horário do *laser*) do DOE.

Como se observa na figura 3.19, o padrão não apresenta distorção, apenas uma pequena translação, que é dada por $b - a \approx 5$ mm. A alteração da potência dos seus pontos é pouco significativa. De notar que rodando o *laser* altera-se o ângulo de incidência no DOE, mas a alteração não é tão elevada como a que se obtém rodando o DOE até às suas posições extremas.

Neste caso, a translação observada não é relevante pois não cobre todo o espaço entre os pontos. Ou seja, no deslocamento do *laser* da esquerda para a direita, o ideal é que o ponto mais à esquerda inicialmente ocupe no final do deslocamento a posição inicial do ponto central. E que o ponto central ocupe a posição inicial do ponto mais à direita. Assim, toda a distância entre os pontos é varrida. Mas, outro gênero de padrão, com o DOE com maior área, pode conseguir fazê-lo. Como o objetivo final é o desenvolvimento de um emissor não mecânico, este método para iluminar uma maior área e diminuir a distância entre os pontos pode ser implementando usando uma matriz de *lasers* dispostos lado a lado, emitindo luz alternadamente.

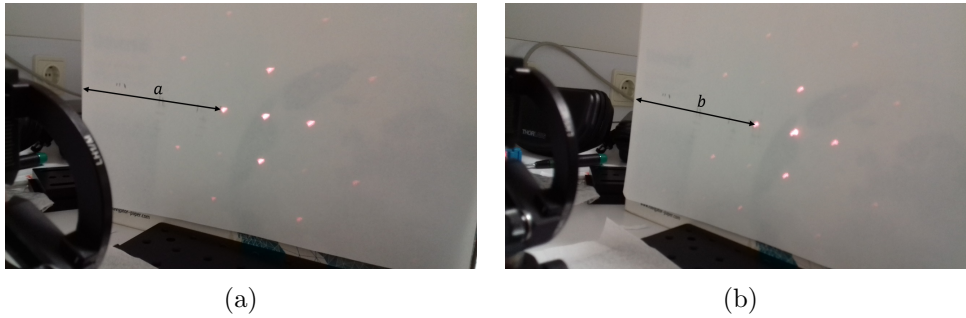


Figura 3.19: Padrão obtido com o feixe mais à (a) esquerda e (b) direita do DOE.

Distância de segurança ocular

Como referido no capítulo 1, uma questão importante relativa ao encapsulamento é a distância que os limites da cápsula apresentam em relação ao emissor. Esta tem de ter dimensões suficientes que impossibilitem a existência de zonas que ponham em causa a segurança ocular em condições normais de utilização. O comprimento de onda do *laser* utilizado experimentalmente situa-se no espectro visível, por isso a exposição máxima permitida assumida seguidamente foi obtida a partir do gráfico da figura 3.20.

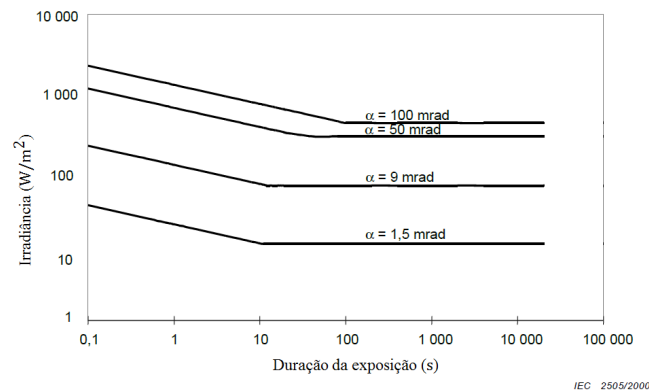


Figura 3.20: Máxima exposição permitida para proteger de dano termal ($\lambda = 400$ a 700 nm) para quatro α entre 1,5 e 100 mrad (adaptado de [16]).

Apesar de não ter sido calculado α para a fonte utilizada, assumiu-se o menor valor apresentado no gráfico, ou seja, $\alpha = 1,5$ mrad. Assim, caso o α da fonte seja maior, o

valor assumido é igualmente seguro. A máxima exposição permitida é aproximadamente $10 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ mW/cm}^2$. A área ativa do sensor S120C é $0,97^2 \approx 1 \text{ cm}^2$ [46]. Portanto, considerou-se que a potência até 1 mW é segura.

Como se viu anteriormente, o ponto central do padrão é o ponto com maior potência. Ou seja, se este ponto apresenta a potência permitida a uma dada distância, os restantes pontos já têm uma potência segura. Por esta razão, a potência foi registada com o medidor de potência alinhado com o centro do DOE para várias distâncias entre ambos e diferentes I_{LD} . Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos da figura 3.21.

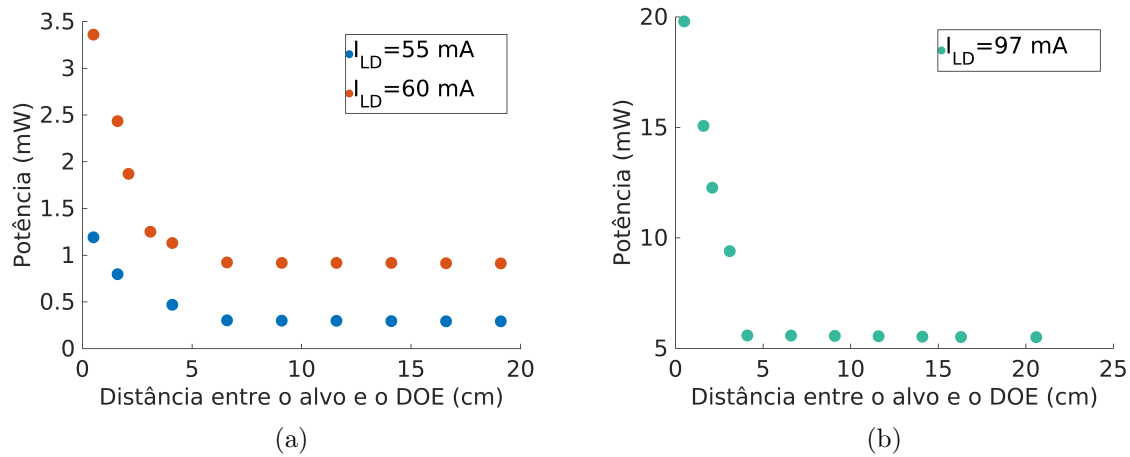


Figura 3.21: Gráfico da evolução da potência central com a distância ao DOE para I_{LD} de (a) 55 mA e 60 mA e (b) 97 mA

Observa-se que a potência decai rapidamente, apresentando um valor aparentemente constante a partir de uma distância de 5 cm. Isto acontece porque, ainda nas proximidades do DOE, os pontos não estão completamente afastados estando a potência dos vários pontos concentrada numa área pequena. Afastando o medidor, a potência que se regista corresponde a apenas um ponto luminoso.

Como explicado anteriormente, considerou-se como potência segura 1 mW , para a luz no comprimento de onda utilizado. Através dos gráficos da figura 3.21, verifica-se que com a I_{LD} de 97 mA, a segurança não é alcançável. Comparando a I_{LD} de 55 mA com a de 60 mA, conclui-se que na primeira pode-se ter uma cápsula menor, pois a potência é segura logo após os 2 cm, porém a potência dos pontos é também menor. Com 60 mA, consegue-se ter pontos com uma maior potência, mas a luz só é considerada segura a distâncias superiores a 5 cm. Assim, o encapsulamento tem de ser maior. Quanto menor for a potência total emitida, menores são as dimensões do encapsulamento e a potência dos pontos no padrão. Logo, tem de existir um equilíbrio entre a potência de cada ponto e as dimensões que se pretende que o dispositivo apresente.

Influência do suporte utilizado

Para a estudar a influência do suporte utilizado na obtenção do padrão, foi interposto o diafragma da figura 3.22a entre o *laser* e o DOE. A sua abertura foi reduzida para que o feixe chegasse ao DOE com uma menor área, que não era coberta pelas garras do suporte. A montagem experimental é apresentada na figura 3.22b.

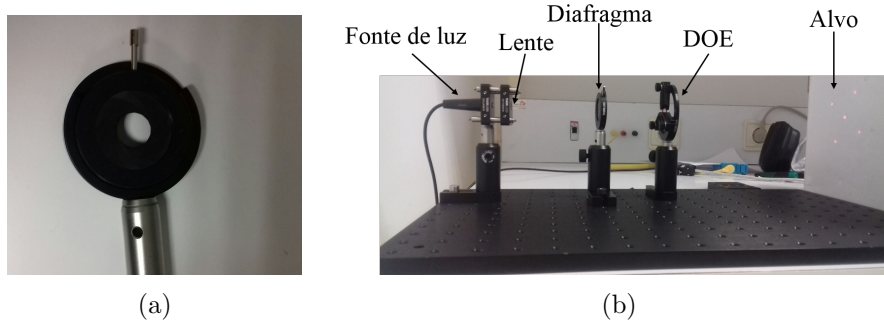


Figura 3.22: (a) Diafragma utilizado e (b) montagem experimental com a sua interposição.

As imagens dos padrões gerados a duas distâncias encontram-se na figura 3.23. Ao lado de cada fotografia, são apresentadas as imagens de cada ponto luminoso correspondente capturadas com o perfilômetro. Comparando as imagens da figura 3.15 e 3.16 com a figura 3.23, observa-se uma melhor definição dos pontos na última apesar de estes se apresentarem mais pequenos.

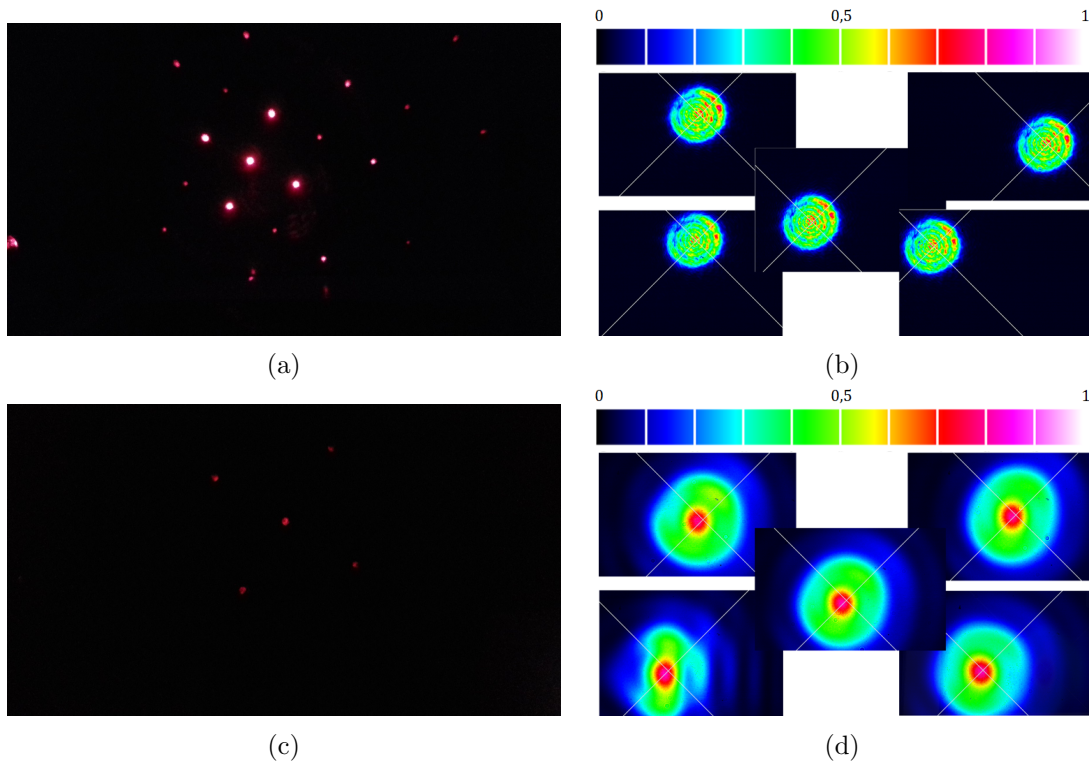


Figura 3.23: À esquerda, fotografias dos padrões e, à direita, imagens obtidas através do perfilômetro, com o diafragma entre o *laser* e o DOE e o alvo a uma distância de (a), (b) $21,50 \pm 0,05$ cm e (c),(d) aproximadamente 5,5 m do DOE.

O ponto luminoso apresenta a forma de um círculo, definido pela abertura do diafragma. A sua forma não foi afetada pelas garras do suporte, pois as dimensões do feixe que chegam ao DOE são menores. O comportamento gaussiano também se manteve até ao alvo, pois o

diafragma limitou o feixe fazendo com que apenas a zona central do feixe passasse, obstruindo as zonas mais externas. Na figura 3.23d, o ponto inferior esquerdo apresenta uma alteração, que se pode dever à zona em que este se situa. Na sala em que os padrões foram gerados, existem outros equipamentos, que podem ter obstruído a passagem deste.

Foram novamente efetuadas medições da potência em diferentes zonas do sistema. Mesmo antes do diafragma, registou-se uma potência de 27,14 mW que diminui para 11,85 mW quando medida logo após o diafragma. A perda de potência no diafragma é significativa, mais de metade da inicial. Antes do DOE tem-se uma potência de 11,77 mW que diminui para 9,252 mW depois do DOE. A perda é de $(11,77 - 9,252)/11,77 \approx 21\%$, que é inferior aos 26% calculados anteriormente. Neste caso, como o feixe é menor, o DOE apresenta menos perdas do que registado anteriormente, pois já não há perturbação devido às garras do suporte. As medições efetuadas, que apresentam menor perdas, corroboram a contribuição do suporte do DOE para as perdas registadas anteriormente.

Outro teste realizado, para estudar o comportamento do conjunto do DOE e suporte, utilizou o feixe não colimado, ou seja, o feixe maior. Para isso, retirou-se a lente colimadora. A imagem do feixe não colimado é apresentada na figura 3.24a e a sua divisão na figura 3.24b.

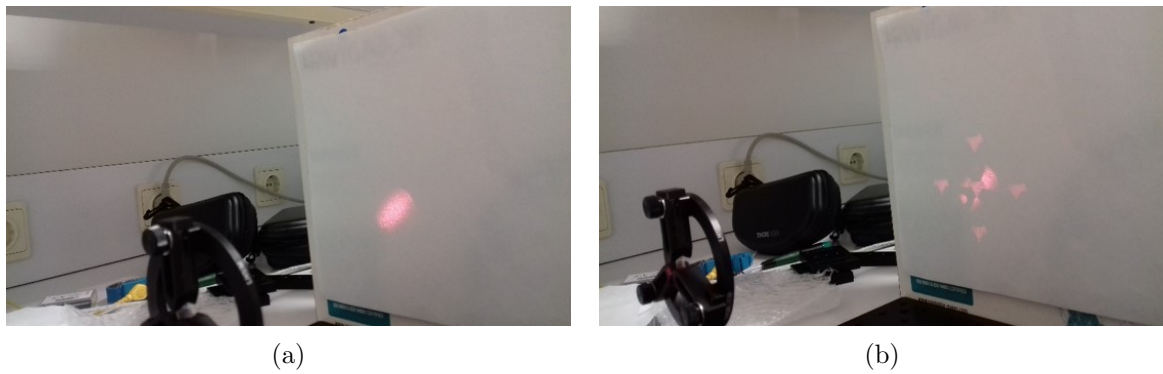


Figura 3.24: (a) Feixe laser não colimado e (b) padrão obtido com a interposição do DOE.

Conclui-se que o máximo central no padrão é devido essencialmente à transmissão do feixe, pois observa-se a forma do DOE no alvo iluminada. Para além disso, os restantes pontos têm a mesma forma entre si, aproximadamente triangular, que estão definidas pela forma das garras do suporte. Como o feixe não está colimado, a divergência é elevada. Os vários pontos resultantes da divisão do feixe, também apresentam grande divergência. À medida que o alvo se afasta, a potência é distribuída por uma maior área fazendo com que se tornem manchas menos perceptíveis do que os pontos obtidos com o feixe colimado.

Confirma-se assim que as garras do suporte contribuem para as perdas apresentadas após a divisão do feixe pelo DOE e também para a alteração da forma dos pontos.

Diferentes DOEs

Seguidamente, são apresentadas a análise e comparação essencialmente qualitativa dos padrões de diferentes DOEs. Em termos aplicacionais, a distância entre os pontos luminosos no padrão não pode ser muito grande para que um obstáculo mais estreito, como um ciclista, não passe despercebido, mas também é desejável ter um padrão com uma grande abertura para abranger uma maior área do cenário. Para este estudo, os padrões foram fotografados

com o alvo a duas distâncias diferentes (21,5 cm e 5,5 m, aproximadamente). As imagens encontram-se nas figuras seguintes.

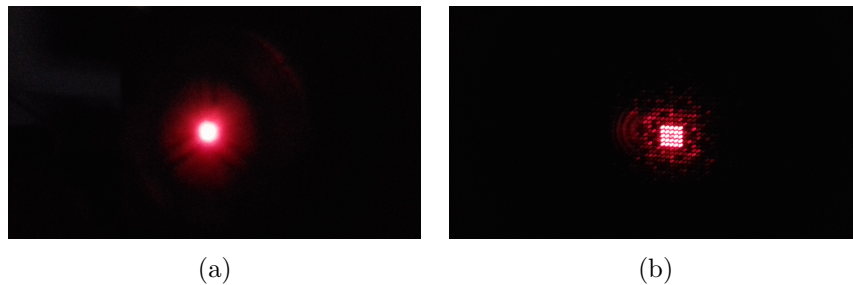


Figura 3.25: Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 353 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.

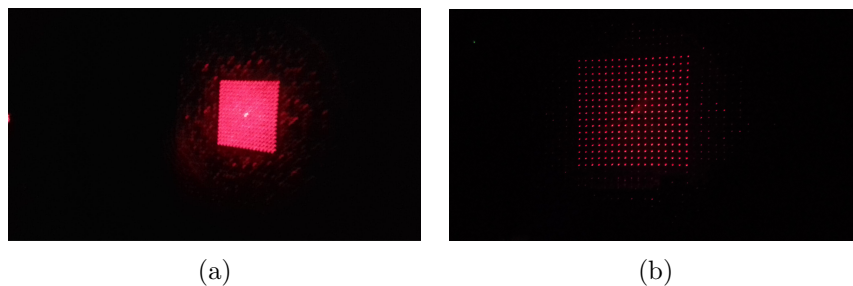


Figura 3.26: Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 206 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.

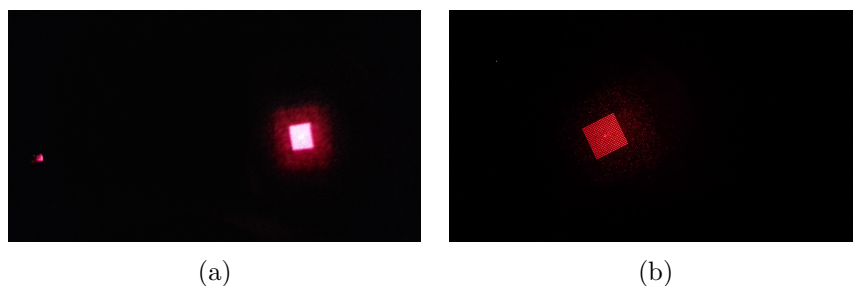


Figura 3.27: Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 241 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.

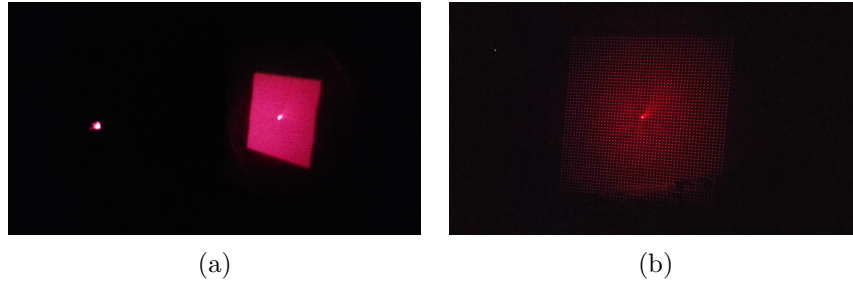


Figura 3.28: Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 257 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.

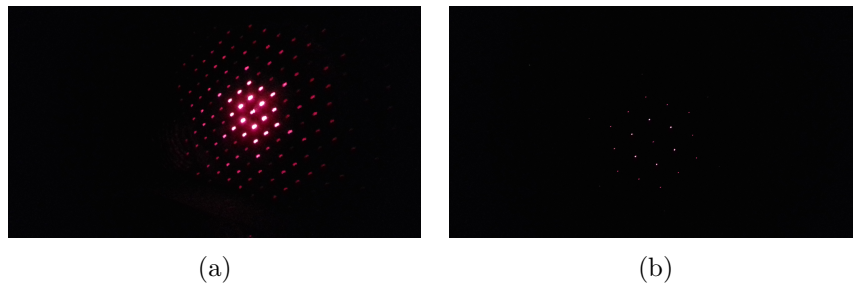


Figura 3.29: Padrão com o alvo a uma distância do DOE DE-R 285 de (a) 21,5 cm e (b) aproximadamente 5,5 m.

Para uma melhor comparação, calculou-se, a partir dos padrões gerados, os dados relativos ao seu tamanho aproximado, número de pontos principais (incluindo o ponto central) e distância entre eles. Estes resultados encontram-se na tabela 3.7.

Referência	Forma	Lado (m)	Número de pontos	Distância entre pontos (cm)
DE-R 353	Quadrado	0,05	$5 \times 5 = 25$	1
DE-R 206	Quadrado	1,1	$17 \times 17 = 289$	7
DE-R 246	Quadrado	0,36	$21 \times 21 = 441$	2
DE-R 257	Quadrado	1,7	$51 \times 51 = 2601$	3
DE-R 285	Hexágono	0,23	7	—

Tabela 3.7: Dados relativos aos diferentes padrões obtidos para a distância de aproximadamente 5,5 m.

Os padrões a uma maior distância são menos perceptíveis para a câmara. De todos os padrões, os da figura 3.25 e 3.29 apresentam a atenuação do ponto central de uma forma mais notória. Conclui-se que é possível desenhar DOEs de forma a que a potência seja igualmente distribuída.

Também se observa, principalmente nas imagens dos padrões a menor distância do DOE, a existência de outras ordens secundárias.

O padrão com 5×5 é aquele que apresenta uma menor área de iluminação do espaço, mas também é aquele que apresenta uma menor distância entre os pontos.

O padrão de 21×21 pontos apresenta uma distância entre os pontos inferior ao de 17×17 pontos. Em comparação com o padrão de 17×17 , o de 21×21 ilumina uma menor área do

alvo mas tem melhor “resolução”, pois a pequena distância entre os pontos permite detetar obstáculos mais pequenos.

Assim, surge também a hipótese de usar mais do que um emissor. Os vários emissores ficam dispostos segundo uma matriz de forma a que os padrões entre os 200 e os 300 m, se complementem, diminuindo a distância entre os pontos sem alterar a potência destes ou a cápsula do emissor. De referir que quando um está a emitir luz, os outros tem de estar desligados. Um esquema dessa hipótese está representada na figura 3.30.

Figura 3.30: Esquema do padrão pretendido a 200 – 300 m com utilização de dois emissores.

3.3 Sumário

Neste capítulo, apresentou-se a caracterização experimental de vários DOEs e demonstrou-se que os DOEs são indicados para a divisão de um feixe em vários, o que leva à obtenção de um padrão com diversos pontos, permitindo a iluminação de um determinado cenário.

Capítulo 4

Considerações finais e trabalho futuro

4.1 Conclusões

O funcionamento do SLM foi estudado teoricamente. Através do modelo desenvolvido, foram gerados padrões de luz para diversas características iniciais. Numa fase inicial, foram calculados padrões considerando as características do SLM PLUTO da Holoeye. Foi possível movimentar o feixe apenas até $2,85^\circ$, para a esquerda ou para a direita do centro do padrão, tornando o campo de visão permitido muito reduzido. Por isso, surgiu a hipótese de o padrão ser constituído por diversos pontos com distribuição uniforme de potência e assim abranger uma maior área do alvo num só pulso, tornando também a velocidade de varrimento menos limitativa na aquisição de informação. Para avaliar a possibilidade da utilização do SLM para dividir o feixe em vários, alteraram-se as características iniciais do SLM considerado. Porém, não se conseguiu gerar um padrão com pontos com a potência uniformemente distribuída. De referir que o modelo desenvolvido utilizou aproximações, não contando com diversos fatores reais como, por exemplo, entre píxeis não há uma mudança brusca de inclinação, tal como o assumido, pois as moléculas vão se orientando de píxel para píxel consoante o campo elétrico de cada localização específica. Ou, como o SLM está montado em modo refletivo, a própria fase imposta também se altera consoante a sua inclinação. Utilizando larguras de píxel inferiores à apresentada pelo PLUTO chega-se a um padrão em que os pontos apresentam aproximadamente a potência igualmente distribuída. O padrão em questão é gerado com uma largura de píxel de $0,2 \mu\text{m}$, que é inferior pelo menos dez vezes à largura de píxel dos SLMs comercialmente disponíveis. Apesar da potência bem distribuída, a razão I/I_0 é muito baixa em comparação com a dos outros padrões.

Surgiu então a alternativa da integração de DOEs. Começou-se por testar os DOEs do catálogo da Holoeye, cuja microestrutura é desenhada para dividir o feixe de determinada forma. Assim, não foi necessário recorrer aos algoritmos complexos que se utilizam para desenhar a estrutura que gera o padrão pretendido. Para além disso, ainda é necessário definir qual a distância entre os pontos luminosos no alvo que se pretende, por isso estudar padrões de catálogo permite recolher as características mais vantajosas a definir no padrão final. O feixe *laser* foi colimado para que o padrão final fosse constituído por diversos pequenos pontos e não grandes manchas, que como têm a potência espalhada por uma maior área são menos perceptíveis. A sala onde decorreu o trabalho experimental permitiu observar os diversos

padrões até aproximadamente 5,5 m, não sendo possível observar o seu comportamento para distâncias maiores que os 200 m. Mas assumiu-se que a distância entre os pontos aumenta da mesma forma com a distância. O perfil dos pontos obtidos com o DOE estava distorcido, não apresentando a forma de uma elipse, tal como o feixe inicial. Foi interposto um diafragma na montagem experimental, para a área do feixe diminuir e não ser afetado pelas garras do suporte do DOE. Os pontos no padrão apresentaram-se mais pequenos, mas com uma forma circular, por isso concluiu-se que o DOE divide o feixe em vários feixes com a forma igual, mas neste caso o suporte estava a influenciar a forma dos pontos gerados. Também foi realizado um pequeno reparo acerca da distância de segurança ocular. O dispositivo tem de ser de classe 1, o que torna necessário estudar a dimensão da cápsula. Se o *laser* for pouco potente, a cápsula pode ser menor. Mas, quando o feixe é dividido em vários pontos, estes apresentam uma potência ainda menor. Conclui-se que o feixe inicial pode ter mais energia que a permitida, desde que os feixes resultantes da divisão apresentem a potência segura e a cápsula limite a zona em que estes ainda não se encontrem completamente divididos.

Os DOEs não são programáveis, tal como SLM, gerando sempre o mesmo padrão. Apesar disso, são mais leves, baratos, de fácil integração e indicados para a obtenção de padrões com múltiplos pontos.

4.2 Trabalho futuro

Este trabalho permitiu concluir que a utilização de DOEs no emissor para LIDAR é o caminho a seguir, servindo portanto de base para trabalhos futuros em emissores para LIDAR.

Como trabalho futuro é proposto estudar como os padrões se comportam a maiores distâncias e verificar as características que o padrão deve apresentar a 200 – 300 m. A partir daí, utilizar um DOE com a microestrutura personalizada para o comprimento de onda que se pretende utilizar, ou seja, 760 nm, e para gerar o padrão otimizado. De seguida, ter em conta a potência segura para que seja ajustada a potência do *laser* e a distância prevista para o encapsulamento. No decorrer do trabalho, surgiu outra abordagem a ser estudada: dispor vários *lasers* segundo uma matriz. Mesmo que a distância entre os pontos de um padrão não seja pequena o suficiente, os pontos do padrão devido a outro *laser* podem complementá-lo. Deste modo, a distância entre os pontos diminui, sem que a sua potência também diminua devido ao aumento do número de pontos.

Bibliografia

- [1] Gert Rudolph and Uwe Voelzke. Three sensor types drive autonomous vehicles. <https://www.sensorsmag.com/components/three-sensor-types-drive-autonomous-vehicles>, November 2017. Acesso: 2018-07-17.
- [2] Ann Neal. Lidar vs. radar. <https://www.sensorsmag.com/components/lidar-vs-radar>, April 2018. Acesso: 2018-07-17.
- [3] William C. Stone, Maris Juberts, Nick Dagalakakis, Jack Stone, and Jason Gorman. Performance Analysis of Next- Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility. Technical report, NIST Interagency (NISTIR), Maryland, 2004.
- [4] Jeff Hecht. Lidar for self-driving cars. https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_29/january_2018/features/lidar_for_self-driving-cars/, January 2018. Acesso: 2018-08-13.
- [5] Giorgio Fiocco. Reminiscences of early work at mit and esrin 1963-1974. volume 561, page 3, 2004.
- [6] Scott R Davis, Scott D Rommel, Derek Gann, Ben Luey, Joseph D Gamble, Michael Ziemkiewicz, and Mike Anderson. A lightweight, rugged, solid state laser radar system enabled by non-mechanical electro-optic beam steerers. *Laser Radar Technology and Applications XXI*, 9832:98320K, 2016.
- [7] Introducing waymo’s suite of custom-built, self-driving hardware. <https://medium.com/waymo/introducing-waymos-suite-of-custom-built-self-driving-hardware-c47d1714563>, February 2017. Acesso: 2018-08-13.
- [8] Nick Mokey. A self-driving car in every driveway? solid-state lidar is the key. <https://www.digitaltrends.com/cars/solid-state-lidar-for-self-driving-cars/>, March 2018. Acesso: 2018-08-13.
- [9] Ryan Whitwam. Waymo buys ‘thousands’ more self-driving vehicles from fiat chrysler. <https://www.extremetech.com/extreme/263057-waymo-buys-thousands-self-driving-vehicles-fiat-chrysler>, January 2018. Acesso: 2018-08-13.
- [10] Waymo. Journey. <https://waymo.com/journey/>. Acesso: 2018-11-16.
- [11] Ali Osman Ors. Radar, camera, lidar and v2x for autonomous cars. <https://blog.nxp.com/automotive/radar-camera-and-lidar-for-autonomous-cars>, May 2017. Acesso: 2018-07-17.

- [12] Brandon Smith, Adley Gin, Alonzo Espinoza, and Yuzuru Takashima. Single chip lidar with discrete beam steering by digital micromirror device. *Optics Express*, 25(13):14732–14745, June 2017.
- [13] James R. Lindle, Abbie T. Watnik, and Vincent A. Cassella. Efficient multibeam large-angle nonmechanical laser beam steering from computer-generated holograms rendered on a liquid crystal spatial light modulator. *Applied Optics*, 55(16):4336–4341, June 2016.
- [14] Velodyne LiDAR. Hdl-64e. <https://velodynelidar.com/hdl-64e.html>. Acesso: 2018-08-13.
- [15] R. Paschotta. laser safety. https://www.rp-photonics.com/laser_safety.html. Acesso: 2018-10-23.
- [16] International Standard. Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user’s guide. Technical report, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2001.
- [17] R. Paschotta. beam quality. https://www.rp-photonics.com/beam_quality.html. Acesso: 2018-10-23.
- [18] Warren J Smith. *Modern optical engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 1966.
- [19] Rupak Paudel, Zabih Ghassemlooy, Hoa Le-Minh, and Sujan Rajbhandari. Modelling of free space optical link for ground-to-train communications using a gaussian source. *IET Optoelectronics*, 7(1):1–8, 2013.
- [20] Christian Hill and Roderick L Jones. Absorption of solar radiation by water vapor in clear and cloudy skies: Implications for anomalous absorption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D7):9421–9428, 2000.
- [21] Wikipedia. Solar irradiance. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance. Acesso: 2018-05-28.
- [22] R. Paschotta. eye-safe lasers. https://www.rp-photonics.com/eye_safe_lasers.html. Acesso: 2018-10-23.
- [23] Alex Davies. Luminar’s new lidar could bring vision to every robocar in the world. <https://www.wired.com/story/luminar-lidar-self-driving-cars/>, April 2018. Acesso: 2018-11-16.
- [24] Mike Bezemek. It began with a race...16 years of velodyne lidar. <https://velodynelidar.com/newsroom/it-began-with-a-race/>. Acesso: 2018-11-01.
- [25] Ron Amadeo. Google’s waymo invests in lidar technology, cuts costs by 90 percent. <https://arstechnica.com/cars/2017/01/googles-waymo-invests-in-lidar-technology-cuts-costs-by-90-percent/>, October 2017. Acesso: 2018-09-26.
- [26] Velodyne LiDAR. Velodyne slashes the price in half of its most popular lidar sensor. <https://velodynelidar.com/newsroom/velodyne-slashes-the-price-in-half-of-its-most-popular-lidar-sensor/>. Acesso: 2018-11-15.

- [27] Velodyne LiDAR. Velodyne lidar announces new “velarray” lidar sensor. <http://velodynelidar.com/newsroom/velodyne-lidar-announces-new-velarray-lidar-sensor/>. Acesso: 2018-11-03.
- [28] Velodyne LiDAR. Puck vlp-16. <https://velodynelidar.com/vlp-16.html>. Acesso: 2018-08-13.
- [29] Velodyne LiDAR. Velodyne lidar hdl-64e). https://www.goetting-agv.com/dateien/downloads/63-9194_Rev-G_HDL-64E_S3_Spec%20Sheet_Web.pdf. Acesso: 2018-11-15.
- [30] Velodyne LiDAR. Velodyne lidar puck). https://www.cadden.fr/wp-content/uploads/2017/02/Velodyne_VLP-16-Puck.pdf. Acesso: 2018-11-15.
- [31] Zichen Zhang, Zheng You, and Daping Chu. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (lcos) devices. *Light: Science & Applications*, 3(10):e213, October 2014.
- [32] John Wilson and John Hawkes. *Optoelectronics - an introduction*. Prentice Hall, 3rd edition, 1998.
- [33] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of photonics*. John Wiley & Sons, 1991.
- [34] TCI America. Liquid crystal materials. <https://www.tcichemicals.com/pdf/F2036E.pdf>. Acesso: 2018-08-14.
- [35] Holoeye. *PLUTO, phase only spatial light modulator. Device Operating Instructions*, 2015.
- [36] Mário Ferreira. *Óptica e Fotónica*. Lidel, 2003.
- [37] Naoya Matsumoto, Taro Ando, Takashi Inoue, Yoshiyuki Ohtake, Norihiro Fukuchi, and Tsutomu Hara. Generation of high-quality higher-order laguerre-gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators. *JOSA A*, 25(7):1642–1651, 2008.
- [38] Holoeye. Pluto-2 phase only spatial light modulator (reflective). <https://holoeye.com/spatial-light-modulators/slm-pluto-phase-only/>. Acesso: 2018-08-14.
- [39] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson Education, 4th edition, 2016.
- [40] Phasor diagrams of waves. <http://kshitij-iitjee.com/phasor-diagrams-of-waves/>. Acesso: 2018-08-29.
- [41] Holoeye. Gaea-2 10 megapixel phase only spatial light modulator (reflective). <https://holoeye.com/spatial-light-modulators/gaea-4k-phase-only-spatial-light-modulator/>. Acesso: 2018-08-28.
- [42] Holoeye. Diffractive optical elements (doe). <https://holoeye.com/diffractive-optics/>. Acesso: 2018-08-18.
- [43] HL6738mg. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HL6738MG>. Acesso: 2018-06-14.

- [44] Edmund Optics. Fundamentals of lasers. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/lasers/fundamentals-of-lasers/>. Acesso: 2018-09-03.
- [45] De-r 223 diffractive optical element. https://holoeye.com/wp-content/uploads/DE-R223_Diffractive_Optical_Element.pdf. Acesso: 2018-07-06.
- [46] Thorlabs. Compact photodiode power head with silicon detector s120c. <https://www.thorlabs.com/drawings/e190f143d39cbbad-6721264A-F617-F3F5-919F4B7C34CAAF20/S120C-SpecSheet.pdf>. Acesso: 2018-08-04.

